

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

**PREVISÃO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
CONSIDERANDO AS POSSIBILIDADES DAS REDES
INTELIGENTES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Enoque Dutra Garcia

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

PREVISÃO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO AS POSSIBILIDADES DAS REDES INTELIGENTES

Enoque Dutra Garcia

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente (CEEMA), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM/RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

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

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

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

Garcia, Enoque Dutra
Previsão de tensão em sistemas de distribuição
considerando as possibilidades das redes inteligentes /
Enoque Dutra Garcia.-2012.
133 p.; 30cm

Orientadora: Luciane Canha
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2012

1. Controle de Tensão. 2. Previsão de Tensão. 3.
Qualidade da Energia Elétrica. 4. Redes Inteligentes. 5.
Sistemas Elétricos de Potência. I. Canha, Luciane II.
Título.

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**PREVISÃO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
CONSIDERANDO AS POSSIBILIDADES DAS REDES INTELIGENTES**

elaborada por
Enoque Dutra Garcia

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Luciane Neves Canha, Dra.
(Presidente/Orientador)

Gladis Bordin, Dra. (UFRGS/RS)

Alzenira da Rosa Abaide, Dra. (UFSM/RS)

Santa Maria, 09 de Novembro de 2012.

Dedico esta dissertação à minha esposa, Gabi,
que por todos estes anos tem incentivado,
participado, e principalmente acreditado
na concretização de nossos sonhos.

"Há uma força motriz muito mais poderosa que o vapor,
a eletricidade e a energia atômica:
a vontade."

ALBERT EINSTEIN

AGRADECIMENTO

Referencio as bênçãos de Deus por todas as oportunidades a mim concedidas.

Agradeço a Professora Dra. Luciane Neves Canha, a qual além de lançar desafios e orientar as ideias, também transmitiu conhecimentos, proporcionou incentivo e passou importantes lições de vida.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria.

Especialmente cumprimento meus pais pela permissão concedida para encarar desafios pessoais desde a adolescência. A minha mãe Clair pelos ensinamentos de fé e ao meu pai Pedro pela valorização do trabalho.

Estendo meus agradecimentos aos meus irmãos: Paulo Isaque e família, Jairo e Lidia, pois vocês me possibilitaram acreditar mesmo nas condições imprevisíveis e valorizaram todas as minhas conquistas.

Destaco a importância da Gabi, minha parceira de todos os momentos, a qual me passou muita energia positiva para realização deste trabalho.

Meu obrigado a direção da Certaja e aos demais colegas de trabalho pelo estímulo à minha qualificação.

Representando os demais amigos e colegas engenheiros, os quais contribuíram com sugestões e dados técnicos, eu agradeço ao doutorando Paulo Ricardo Pereira da Silva.

A todos os demais amigos e familiares sou grato pela compreensão durante o período que priorizei os estudos e subtraí os tempos de lazer.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

PREVISÃO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO AS POSSIBILIDADES DAS REDES INTELIGENTES

AUTOR: ENOQUE DUTRA GARCIA

ORIENTADORA: LUCIANE NEVES CANHA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 09 de Novembro de 2012.

Diante da implantação das redes inteligentes, a qualidade da tensão passa a ter um novo enfoque, e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão regulador brasileiro, tem possibilidade de aprimorar sua atividade fiscalizatória. O usuário de energia elétrica tem acesso ao valor da tensão em tempo real e a distribuidora por sua vez, necessita identificar alternativas para atender ao rigor dos atos regulatórios e a expectativa intensa de seus clientes. Atualmente, nas redes convencionais o ajuste de tensão é realizado a partir da tensão de referência do próprio ponto ou do centro de carga. Já no cenário das redes inteligentes, além destes, também é possível utilizar os registros online das grandezas de outros trechos do alimentador, inclusive pontos a jusante. Neste novo cenário é oportuno identificar alternativas relacionadas ao avanço da qualidade da energia nas redes de distribuição, neste sentido, o presente trabalho apresenta uma metodologia a ser utilizada como ferramenta de apoio operacional no controle do perfil de tensão nas redes primárias. Através da aplicação de técnicas de inteligência computacional é proposto um sistema de previsão de tensão em regime permanente para pontos de monitoramento localizados ao longo do alimentador. Para tanto são utilizados dados do carregamento do sistema e informações meteorológicas. A partir dos resultados obtidos para a previsão no curtíssimo prazo é introduzido o conceito de controle de tensão inteligente, o qual considera a tomada de ações proativas para otimizar o processo de manutenção dos níveis de tensão.

Palavras-chave: Controle de Tensão. Previsão de Tensão. Qualidade da Energia Elétrica. Redes Inteligentes. Sistemas Elétricos de Potência.

ABSTRACT

Master Course Dissertation
Post Graduation Program in Electric Engineering
Universidade Federal de Santa Maria

PREVISION OF VOLTAGE IN DISTRIBUTION SYSTEM CONSIDERING THE POSSIBILITIES OF SMART GRIDS

AUTHOR: ENOQUE DUTRA GARCIA

ADVISER: LUCIANE NEVES CANHA

Defense Place and Date: Santa Maria, November 09, 2012.

With the deployment of Smart Grids, the voltage quality has a new focus, and the ANEEL (National Agency of Electric Energy), Brazilian regulator organ, is able to improve its supervision activity. The electric energy customer has access to the value of voltage in real time and the utility needs to identify alternatives to attend the rigor of the regulatory acts and the intense expectative of its customers. Nowadays, in the conventional networks, the voltage setting is performed from the reference voltage set point of itself or of center of load. In the scenario of Smart Grids, beyond these values, it is also possible to use the online measures at any point of the feeder. In this new scenario it is possible to indentify alternatives related to advances in distribution networks power quality, in this way, the present work shows a methodology to be used as tools of operational support in the control of voltage profile in primary networks. Through application of computational intelligent techniques it is suggested a system of steady state voltage prediction for the monitored points along the feeder. The loading system and meteorological informations are used for the method application. From the result obtained for the very-short time forecasting, it is introduced the concept of Smart Grids, which considers proactive actions to optimize the process of maintenance of voltage level.

Keywords: Voltage Control; Voltage Forecast, Electric Energy Quality, Smart Grids, Power Electric System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema simplificado de relé regulador de tensão	36
Figura 2.2 – Medição da tensão no lado da carga	39
Figura 2.3 – Faixa de insensibilidade e temporização.....	40
Figura 2.4 – Compensação de queda na linha	40
Figura 3.1 – Conversão das redes convencionais em redes inteligentes	45
Figura 3.2 – Controle de tensão no cenário da redes inteligentes	46
Figura 3.3 – Abrangência das redes inteligentes.	47
Figura 3.4 – Representação dos componentes das redes inteligentes.....	47
Figura 3.5 – Comportamento da tensão no tempo	49
Figura 3.6 – Distúrbios da energia elétrica	56
Figura 3.7 – Faixas de tensão em relação à referência	59
Figura 3.8 – Faixas regulamentadas para Média Tensão.	60
Figura 4.1 – Esquema de relé regulador de tensão com módulo inteligente	65
Figura 4.2 – Diagrama da metodologia por ponto e por fase	67
Figura 4.3 – Demonstração da janela de tempo e horizonte de previsão.....	69
Figura 4.4 – Curva de carga típica por patamar	70
Figura 4.5 – Ilustração da janela de dados no tempo.....	71
Figura 4.6 – Detalhe do bloco previsor de tensão por patamar	72
Figura 4.7 – Detalhe da metodologia referente a faixa de tensão.....	73
Figura 4.8 – <i>Fuzzificação</i> das faixas de tensão.....	73
Figura 4.9 – Saída do controle <i>fuzzy</i> para faixas de tensão.....	74
Figura 4.10 – Saída <i>fuzzy</i> referente a ponderação da transgressão de tensão	75
Figura 4.11 – Detalhe da metodologia referente aos índices utilizados.....	76
Figura 4.12 – <i>Fuzzificação</i> do índice proposto DRP_{E10}	77
Figura 4.13 – <i>Fuzzificação</i> do índice proposto DRC_{E10}	77
Figura 4.14 – <i>Defuzzificação</i> dos índices de qualidade DRP_{E10} e DRC_{E10}	78
Figura 4.15 – Saída <i>fuzzy</i> referente a ponderação da violação de indicadores	78
Figura 4.16 – Detalhe da metodologia referente à ação indicada.....	79
Figura 4.17 – Saída <i>fuzzy</i> referente à ponderação do índice.....	79
Figura 4.18 – Saída <i>fuzzy</i> referente à ponderação da tensão.....	80
Figura 4.19 – Inferências utilizadas no controle “Ação Indicada”	80
Figura 4.20 – Saídas <i>fuzzy</i> obtidas para o conjunto de checagem.....	82
Figura 5.1 – Diagrama unifilar do alimentador teste	85
Figura 5.2 – Curva de carga típica do alimentador teste	86
Figura 5.3 – Escolha do ponto de monitoramento.....	88
Figura 5.4 – Configuração e resultado do conjunto de validação.	89
Figura 5.5 – Resultado gráfico do conjunto de validação.....	89
Figura 5.6 – Detalhe da ação final indicada pela metodologia	90
Figura 5.7 – Grandezas de entrada do conjunto de checagem	91
Figura 5.8 – Tomada de decisão para conjunto de checagem.....	92
Figura 5.9 – Tomada de decisão sem indicador.....	93

Figura 5.10 – Variáveis de entrada do conjunto de teste do Patamar 2.....	96
Figura 5.11 – Tensão prevista do conjunto de teste do Patamar 2	97
Figura 5.12 – Erro relativo ao conjunto de teste do Patamar 2.....	97
Figura 5.13 – Entradas e saída dos indicadores do Patamar 2	99
Figura 5.14 – Entradas e saída da metodologia para o Patamar 2	99
Figura 5.15 – Ações indicadas para um conjunto de teste Patamar 2.....	100
Figura 1 – Funções de pertinência padrões	120
Figura 2 – Diagrama de um sistema nebuloso.....	120
Figura 3 – Exemplo do método de <i>defuzzificação</i> Centro de Gravidade.....	121
Figura 4 – Diagrama da configuração de um modelo ANFIS.....	123
Figura 5 – Arquitetura de um Sistema <i>Neurofuzzy</i>	123
Figura 6 – Diagrama implementado para metodologia por fase	124
Figura 7 – Detalhes dos subsistemas do diagrama implementado	125
Figura 8 – Diagrama do sistema implementado para simular desequilíbrio	126
Figura 9 – Conjunto de regras do módulo 3 da metodologia	126
Figura 10 – Conjunto de regras do módulo 4 da metodologia	127
Figura 11 – Conjunto de regras relativo ao índice do módulo 5	127
Figura 12 – Conjunto de regras relativo à tensão do módulo 5	127

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFIS	Sistema de Inferência <i>Neurofuzzy</i> Adaptativo
BT	Baixa Tensão
DRC	Duração Relativa de Transgressão Crítica
DRP _{E10}	Índice de duração relativa da transgressão para tensão precária equivalente, no intervalo de 10 amostras
DRC _{E10}	Índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica equivalente, no intervalo de 10 amostras
DRC _M	Duração Relativa Máxima de Transgressão Crítica
DRP	Duração Relativa de Transgressão Precária
DRP _M	Duração Relativa Máxima de Transgressão Precária
FD	Fator de desequilíbrio
LDC	<i>Line Drop Compensation</i> – Compensação de Queda na Linha
LTC	<i>Load Tap Changing</i> – Comutador de Derivação sob Carga
NA _T	Número de amostras acumuladas no período
nlp e nlc	Número de leituras situadas na faixa precária e na faixa crítica
nlp _H e nlp _P	Número de leituras históricas e prevista, situadas na faixa precária
nlc _H e nlc _P	Número de leituras históricas e prevista, situadas na faixa crítica
p.u.	Por unidade
PRODIST	Procedimento de Distribuição do Setor Elétrico Nacional
T	Período do Conjunto da Amostra em Minutos
TAP	<i>Transformer Adjustment Position</i> – Comutador
TL	Tensão de leitura ou a tensão medida no ponto de entrega
TR	Tensão de Referência ou Tensão Contratada na Unidade Consumidora
V _{ab} , V _{bc} , V _{ca}	Magnitude das tensões trifásicas de linha
V ₋ , V ₊	Magnitude da tensão de sequência negativa e sequência positiva
Δ_{ADSUP}	Varição de tensão da faixa adequada superior
Δ_{PRSUP}	Varição de tensão da faixa precária superior
Δ_{ADINF}	Varição de tensão da faixa adequada inferior
Δ_{PRINF}	Varição de tensão da faixa precária inferior
±	Mais ou menos

LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Funcionalidades de controles digitais	131
Anexo B – Parâmetros de ajuste de controles digitais	132
Anexo C – Fluxograma simplificado para níveis de tensão.....	133

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A – Lógica Fuzzy.....	117
Apêndice B – Sistema Neurofuzzy.....	122
Apêndice C – Diagrama de implementação	124

SUMÁRIO

1 PROPOSTA	25
1.1 Introdução.....	25
1.2 Justificativa	27
1.3 Objetivos.....	27
1.4 Organização da dissertação	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 Introdução.....	31
2.2 O controle de tensão nos sistemas de distribuição	32
2.3 Dispositivos empregados no controle de tensão	33
2.3.1 Banco de capacitores	34
2.3.2 Transformadores de distribuição	34
2.3.3 Relé 90 e comutador sob carga.....	35
2.3.4 Banco de regulador de tensão.....	37
2.4 Parâmetros para o controle de tensão	38
2.4.1 Tensão de referência	38
2.4.2 Insensibilidade e temporização	39
2.4.3 Compensação por queda de tensão na linha.....	40
2.5 Considerações finais do capítulo	41
3 AS REDES INTELIGENTES E A QUALIDADE DA TENSÃO	43
3.1 Automação dos sistemas de distribuição e as redes inteligentes.....	43
3.2 Controle inteligente de tensão	48
3.2.1 Sistemas inteligentes de previsão de tensão	49
3.2.2 Sistemas inteligentes para avaliação da tensão	53
3.3 Qualidade da tensão conforme PRODIST	55
3.4 Qualidade no cenário das redes inteligentes	62
3.5 Considerações finais do capítulo	64
4 METODOLOGIA DESENVOLVIDA	65
4.1 Introdução.....	65
4.2 Detalhe da metodologia desenvolvida	66
4.2.1 Detalhamento do diagrama da metodologia.....	67
4.2.2 Previsão da tensão	68
4.2.3 Análise da transgressão da faixa de tensão.....	73
4.2.4 Indicadores utilizados na metodologia	75
4.2.5 Ação indicada pela metodologia.....	79
4.3 Considerações finais do capítulo	82
5 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E RESULTADOS OBTIDOS	85
5.1 Introdução.....	85
5.2 Cenário para aplicação da metodologia.....	86
5.3 Escolha do ponto para aplicação da metodologia.....	87
5.4 Validação da metodologia	88
5.5 Aplicação prática da metodologia para previsão de tensão.....	94
5.6 Detalhes da metodologia para tomada de decisão.....	98
5.7 Considerações finais do capítulo	101

6 CONCLUSÕES	103
6.1 Conclusões obtidas	103
6.1.1 Sobre o controle de tensão nas redes inteligentes.....	103
6.1.2 Sobre a previsão de tensão e a tomada de decisão.....	104
6.1.3 Sobre os resultados obtidos.....	105
6.2 Principais contribuições deste trabalho.....	106
6.3 Artigos publicados	106
6.4 Perspectivas de trabalhos futuros	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICES	117
ANEXOS.....	129

1 PROPOSTA

Neste primeiro capítulo são abordadas uma introdução, a justificativa, os objetivos do trabalho e a estrutura da apresentação.

1.1 Introdução

Estão em debate no setor elétrico mundial a introdução de novas tecnologias e alterações regulatórias nos sistemas de distribuição de energia elétrica, principalmente através dos conceitos relacionados às redes de distribuição do futuro, as chamadas redes inteligentes (*smarts grids*). Como se trata de um conceito em desenvolvimento, muitas definições são utilizadas, mas o objetivo principal é melhorar o monitoramento do sistema elétrico, além de possibilitar a redução dos custos operacionais e diminuição das perdas de energia.

De maneira decorrente espera-se aumentar a eficiência energética, a confiabilidade e a transparência no fornecimento de energia elétrica, tanto no atendimento, quanto na qualidade do produto e continuidade do serviço. (ANEEL, 2010e).

No cenário das redes inteligentes haverá um acréscimo no monitoramento da qualidade, já que a tecnologia permite a interatividade do usuário e possibilita que o órgão regulador seja mais atuante na realização de atos regulatórios, uma vez que ocorre aumento dos dados disponíveis e diminuição na assimetria de informações.

As distribuidoras precisam preparar-se para este cenário, considerando a possibilidade de aumento das reclamações relacionadas à qualidade do produto e maior rigor dos índices regulados, por conseguinte, o acréscimo de identificação de transgressões de tensão e a maior probabilidade de violação dos indicadores. (ANEEL, 2010e e 2012a).

O Brasil apresenta uma grande extensão territorial, característica, esta, extensiva às linhas de transmissão e redes de distribuição, constituídas de circuitos igualmente longos, de acordo com Kagan (2005). Características particulares como a grande quantidade de circuitos e alimentadores radiais, somada à grande sazonalidade das cargas ao longo do ano e às variações de carga horárias diárias, representam o grande desafio de controle da tensão no sistema de distribuição.

Além destas peculiaridades, a recente regulamentação da modalidade tarifária horária branca definida em ANEEL (2010f) e a publicação de novos regulamentos para geração distribuída de pequeno porte, apresentada em ANEEL (2012c) contribuem para o aumento da complexidade do sistema elétrico de distribuição.

Assim, este trabalho utiliza as grandezas elétricas monitoradas e as informações climáticas referentes aos pontos distribuídos ao longo do alimentador, como sinais de entrada para um sistema de previsão de tensão no curtíssimo prazo. Para esta aplicação a técnica de inteligência computacional escolhida foi a *Neurofuzzy*.

Na metodologia desenvolvida nesta dissertação são propostos dois novos indicadores de qualidade alternativos ao DRP – Duração Relativa de Transgressão Precária e DRC – Duração Relativa de Transgressão Crítica, regulamentados no PRODIST (Procedimentos de Distribuição do Setor Elétrico Nacional). Estes indicadores são relacionados ao valor previsto e histórico de registros, a fim de analisar a possibilidade de transgressão da faixa de tensão adequada e avaliar a tendência de violação dos índices regulados, cujas ponderações foram realizadas utilizando-se os recursos da Lógica *Fuzzy*.

Em complemento aos relés inteligentes de controle de tensão já desenvolvidos, a metodologia desenvolvida nesta dissertação propõe alternativa para o controle de tensão por fase. Portanto, sua abrangência não se restringe ao ajuste de tensão na barra, ou seja, pode ser aplicada como uma ferramenta de apoio operacional para indicar a ação adequada para o ajuste proativo da tensão por fase para outros pontos do sistema. Contudo, a forma como deve ser efetuada a ação cabe ao relé inteligente, seja através da comutação de transformador, atuação de regulador de tensão, despacho de geração distribuída ou chaveamento de capacitor.

A seguir serão descritos os principais motivos que levaram a desenvolver este trabalho.

1.2 Justificativa

Nos últimos anos os agentes do setor elétrico estão cada vez mais empenhados na melhoria da qualidade da energia elétrica fornecida aos usuários. Esta busca constante implica no aumento da robustez dos sistemas elétricos de distribuição e o aperfeiçoamento dos procedimentos de operação, entretanto ambas as alternativas exigem otimização dos recursos envolvidos.

Diante da peculiaridade de longos alimentadores, a configuração convencional atualmente adotada não oferece o melhor desempenho do sistema, pois ocorrem situações em que a tensão no ponto de ajuste está dentro dos limites admissíveis, porém em trechos afastados do ponto de ajuste os níveis de tensão podem transgredir a faixa adequada. Portanto, ao desconsiderar as tensões medidas em tempo real em outros trechos do circuito não há garantias de que o sistema está operando dentro dos limites da faixa de tensão adequada. (FARAG, 2012).

A partir do monitoramento do sistema de distribuição, previsto no cenário das redes inteligentes, propõe-se que a atuação dos equipamentos de controle de tensão considere além do valor de tensão local, as tensões de referências relativas a outros pontos do sistema de distribuição de energia elétrica. Com base na revisão da literatura técnica, em complemento ao proposto nos estudos de Fu et al. (2006), Spatti (2007), Usida (2007), Bremermann (2008), Guimarães (2008), Farag (2012) e Mcbee et al. (2009, 2012), o presente trabalho justifica-se por apresentar uma metodologia para análise dos níveis de tensão, a partir da recorrência de técnicas de previsão e tomada de decisão, ambas aplicadas no cenário das redes inteligentes.

Em complemento ao apresentado neste item referente a motivação, no próximo item serão descritos os principais objetivos deste trabalho.

1.3 Objetivos

Como objetivo geral deste trabalho tem-se o desenvolvimento de uma metodologia com capacidade de indicar ações proativas para o controle de tensão a partir da previsão de tensão no curtíssimo prazo e análise das transgressões de tensão, contribuindo para que as distribuidoras atendam a regulamentação e a

expectativa de seus clientes. Para atingir esse objetivo foram traçados alguns objetivos específicos, os quais são:

- Caracterizar e compreender o problema de controle de tensão no setor de distribuição de energia elétrica no Brasil;
- Desenvolver um sistema de previsão e avaliação da tensão em relação aos limites regulamentados no PRODIST;
- Propor indicadores alternativos ao DRP e DRC, no intuito de evitar transgressões relevantes e considerar a violação de indicadores no curtíssimo prazo;
- Aplicar o sistema *Neurofuzzy* na previsão de tensão e a Lógica *Fuzzy* na determinação de parâmetros de desempenho;
- Apresentar metodologia que indique ações pró-ativas no controle da tensão;
- Analisar os resultados obtidos e validar a metodologia proposta.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação se fundamenta em seis capítulos: o introdutório apresenta uma abordagem inicial sobre os objetivos do trabalho em relação às alternativas para o controle de tensão no cenário das redes inteligentes.

No segundo momento, estrutura-se um capítulo de revisão bibliográfica sobre o controle de tensão no sistema elétrico de potência. São apresentados os principais equipamentos e funções utilizados na manutenção dos níveis de tensão. Entre as literaturas consultadas estão sintetizados os trabalhos que inspiraram e fundamentaram a escolha dos temas abordados neste trabalho.

A terceira etapa destaca o avanço da automação dos equipamentos de distribuição e traz os conceitos fundamentais para o entendimento das redes inteligentes. Além disso, evidencia a evolução dos modelos regulatórios relacionados à qualidade da energia elétrica e destaca oportunidades de inovação no controle da tensão no regime permanente através da aplicação de inteligência computacional.

A quarta seção apresenta a metodologia desenvolvida e aborda os meios de organização, tratamento e utilização de dados. Neste aspecto, é referenciada a técnica de inteligência computacional adotada para o módulo de previsão da tensão,

as Redes *Neurofuzzy*. Neste capítulo também é detalhado o método aplicado para as etapas de tomada de decisão, com base na Lógica *Fuzzy*.

O capítulo cinco mostra os resultados obtidos nos estudos de caso, cujas simulações consideram dados reais, registrados por distribuidoras de energia elétrica, para validar e aplicar a metodologia desenvolvida.

No último capítulo, são destacados os resultados obtidos a partir do método proposto e apontadas as vantagens de identificar antecipadamente a tensão no sistema elétrico, também são apresentadas as principais contribuições do trabalho, perspectivas de trabalhos futuros e feitas as considerações finais.

O trabalho contempla ainda, o Apêndice A referente à Lógica *Fuzzy*, o Apêndice B relativo às Redes *Neurofuzzy* e o Apêndice C que traz os diagramas implementados para a simulação da metodologia. Nos dois primeiros anexos são apresentadas algumas funcionalidades e exemplos de parâmetros disponíveis nos controles de reguladores de tensão. Já no Anexo C está ilustrado o fluxograma relativo ao atendimento de reclamação do consumidor sobre nível de tensão.

No capítulo a seguir será descrita a revisão bibliográfica referente ao controle de tensão nos sistemas de distribuição e as funcionalidades dos principais dispositivos relacionados ao ajuste da tensão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma síntese da literatura consultada como fundamentação teórica do presente trabalho. Serão fornecidas breves descrições das funcionalidades dos equipamentos elétricos do sistema de distribuição, de relevância para o estudo. As bibliografias referenciadas estão relacionadas ao controle de tensão nos sistemas de distribuição.

2.1 Introdução

Os motivos relacionados ao controle de tensão são de ordem técnica, regulatória e econômica. Neste sentido, os agentes do setor elétrico estão empenhados na melhoria da qualidade da energia elétrica fornecida aos usuários. Esta busca constante implica no aumento da robustez dos sistemas elétricos de distribuição e no aperfeiçoamento dos procedimentos de operação, porém ambas as ações exigem otimização dos recursos envolvidos, fato que inspira pesquisas por alternativas eficientes e viáveis. (KAGAN, 2009).

Diversos trabalhos apresentam estudos relacionados ao controle de tensão no regime permanente, seja na alocação de equipamentos, proposta de novos parâmetros de ajuste e introdução de novas funcionalidades nos dispositivos de operação. No entanto, não foram identificados trabalhos que considerem simultaneamente a previsão de tensão e as informações do sistema em tempo real como ferramenta de apoio operacional para o controle da tensão no regime permanente.

A abrangência da revisão bibliográfica está direcionada a operação, no que se refere ao controle da tensão, cujos procedimentos são referentes ao curto e curtíssimo prazo. Neste âmbito, ações geralmente estão restritas às comutações dos transformadores com mudança de TAP sob carga, atuações dos reguladores de tensão, despacho de geração distribuída e chaveamento de banco de capacitores. (KAGAN, 2005).

2.2 O controle de tensão nos sistemas de distribuição

No planejamento dos sistemas de distribuição são avaliadas as ações no longo prazo para atender os critérios de qualidade do produto e serviço, bem como a tensão para operação normal ou em contingência. (ANEEL, 2010b).

Entre as alternativas consideradas nos estudos relacionados ao controle de tensão são apresentadas, a seguir, as principais: elevação do nível de tensão de operação dos sistemas, balanceamento de carga nos alimentadores, uso de geração distribuída, incremento na bitola dos condutores, transferência de carga para novos alimentadores, banco de capacitores conectados à barra da subestação, adição de fase e divisão da carga, construção de novas subestações, instalação de reguladores de tensão e banco de capacitores nos alimentadores. (KAGAN, 2005).

Após, são referenciados trabalhos que representam a diversidade de alternativas relacionadas ao controle da tensão, por outro lado destacam a complexidade relacionada ao tema.

Referente ao controle de reativos, Feijó (2002) busca a otimização do processo de controle de tensão e potência reativa, para tanto propôs metodologia para a coordenação dos tempos de atuação dos comutadores sob carga, considerando o estado de operação dos bancos capacitores. Neste mesmo contexto, Bremermann (2008) desenvolve uma metodologia de controle de tensão e potência reativa baseada em controle centralizado.

Em Canha et al. (2003) é apresentado o controle de tensão frente a redes de distribuição com geração distribuída e em Padilha (2010) e Martins (2012) são destacadas as opções de operação de geradores distribuídos nos sistemas de distribuição e comparadas diferentes estratégias para regulação da tensão.

Milbradt (2007) desenvolveu software que implementa algoritmos propostos para o ajuste de TAP da subestação, considerando indicador denominado Energia Fornecida Fora do Padrão – EFFF e as quedas de tensão até o centro de carga de cada transformador.

Em abordagem ao controle de tensão nos circuitos de baixa tensão, Pereira, P.R.S. (2009) trouxe uma metodologia que permite a definição de TAPs de transformadores de distribuição, considerando as zonas de TAP. Destaca que os ajustes dos reguladores de tensão do sistema considerem o impacto nos transformadores e circuitos da rede secundária.

A alocação integrada de reguladores de tensão e capacitores foi explorada por Madruga (2010), cujo trabalho abrange revisão bibliográfica sobre alocação e desenvolve ferramenta baseada em Algoritmos Genéticos para a análise do custo-benefício da alocação simultânea de banco de capacitores e reguladores da tensão. No desenvolvimento prático avalia a otimização dos níveis de tensão nas redes primárias e secundárias.

Em Felber (2010) é feita uma análise sobre as diferentes técnicas de regulação de tensão em subestação, entre estas: compensação de queda na linha, dinâmica, estática, por faixas e por sistemas inteligentes. Ao mesmo tempo o autor valida os métodos de controle através das informações obtidas em diferentes pontos do alimentador. Além da ampla revisão bibliográfica sobre controle da tensão em sistemas de distribuição, o trabalho sugere a continuidade dos estudos no cenário das redes inteligentes.

Os principais meios de controle de tensão estão abordados de forma integrada em Mello (2011), cujo trabalho trata o perfil de tensão de operação de redes de distribuição em relação à comutação de TAP de transformador conforme Zonas de TAP e a alocação de banco de capacitor e regulador de tensão.

Diversas iniciativas estão sendo realizadas no sentido de desenvolver e aplicar novos métodos no controle da tensão. Além do esforço dispensado para o fornecimento de tensão adequada no regime permanente, são realizados estudos sobre alternativas para o controle de transitórios e compensação de reativos nos sistemas de distribuição. (MORAIS, 2010).

2.3 Dispositivos empregados no controle de tensão

Com o avanço da regulamentação do setor elétrico foram revistos os fundamentos relativos à qualidade da energia elétrica, por conseguinte novas tecnologias foram introduzidas nos dispositivos para controle da tensão.

Diante da necessidade de identificar novas alternativas para otimização dos procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica nos sistemas de distribuição, a seguir são apresentadas explicações sobre os principais equipamentos aplicados no controle da tensão em regime permanente, tais como: capacitores, transformadores de distribuição, reguladores de tensão, relé 90 e comutador sob carga.

2.3.1 Banco de capacitores

Os capacitores têm capacidade de armazenar energia e atuar como fonte de energia reativa. A partir destas características, estes equipamentos são utilizados nos sistemas elétricos de potência, geralmente alocados na forma de banco de capacitores. A sua utilização está atrelada à correção do fator de potência da rede e controle da tensão, pois o aumento do fator de potência eleva a tensão, reduz as perdas e diminui o carregamento do sistema. (BERNARDON et al., 2005).

Porém, o desempenho do banco de capacitores depende da potência, quantidade, tipo, forma de conexão, tipo de ligação e localização no sistema. Os bancos são classificados como fixos e automáticos, sendo que geralmente os fixos são utilizados em situações de carga leve e os automáticos para condições de carga pesada. (MAMEDE FILHO, 2005).

Quanto a forma de conexão são adotadas a configuração delta, estrela aterrada e estrela com neutro isolado, sendo que nos sistemas de distribuição predomina a ligação de banco em estrela isolada. Referente ao tipo de ligação de bancos de capacitores, normalmente são adotados dois arranjos: em paralelo (*shunt*) ou em série com a rede. Capacitores em paralelo compensam os reativos da rede e aumentam o fator de potência, já em série, a correção do fator de potência é menos significativa, porém elevam a tensão através da redução da reatância da linha. (KAGAN, 2005).

2.3.2 Transformadores de distribuição

Em Mamede Filho (2005) são apresentados os conceitos relacionados ao funcionamento e princípios construtivos dos transformadores, entretanto o ajuste de tensão nos terminais dos transformadores de distribuição é atribuído às derivações nas bobinas do enrolamento primário, as quais permitem alterar a relação de transformação. Estes terminais são denominados como TAPs. (MAMEDE FILHO, 2005).

Entre as características construtivas está o número de TAP, que tipicamente é de três posições com variação de 5% entre si. Desta forma ao TAP 1 é atribuída a tensão nominal e, por conseguinte o TAP 2 equivale a 0,95 p.u. (por unidade) e o

TAP 3 equivale a 0,9 p.u. da tensão nominal do transformador. (BERNARDON et al., 2005).

O principal impedimento de ajuste de tensão através dos transformadores de distribuição está na inviabilidade de comutação sob carga, isto é, para efetuar a troca de TAP é necessário desligar o equipamento. Atualmente, os comutadores estão sendo posicionados na parte externa da carcaça, porém, os equipamentos mais antigos possuem comutadores imersos no óleo isolante. (PEREIRA, P.R.S., 2009).

Conforme Pereira, P.R.S. (2009), quando são realizados ajustes dos níveis de tensão da rede primária é necessário analisar os reflexos nas redes de baixa tensão, portanto, as posições dos TAPs precisam ser avaliadas. Madruga (2010) salienta que estas intervenções geram custos elevados e devem ser ponderadas nas análises de controle de tensão.

Diante da evolução regulatória relacionada à qualidade da tensão de fornecimento, Duarte et al., (2011) e Schuch et al., (2012) demonstram que atualmente estão sendo pesquisadas formas alternativas de ajuste da tensão no secundário dos transformadores de distribuição e nos circuitos de baixa tensão, mas as aplicações práticas ainda são mais indicadas para ações corretivas. No futuro estes dispositivos podem interagir com outros equipamentos do sistema para otimizar o controle da tensão.

2.3.3 Relé 90 e comutador sob carga

Feijó (2002) e Spatti (2007) destacam que os comutadores sob carga variam a relação de espiras entre os enrolamentos do lado primário e secundário. Estes comutadores são identificados por diferentes siglas, nesta dissertação, referenciado como LTC (do inglês Load TAP Changing). Os comandos de mudança de TAP são enviadas ao LTC pelo relé regulador de tensão ou regulador de tensão automático.

Diante do arcabouço regulatório vigente a manutenção das faixas de ajuste dos níveis de tensão na subestação é fundamental para a estabilidade da tensão no sistema, porém, alguns transformadores de potência não são providos de dispositivo para troca de TAP sob carga (LTC). Segundo Usida (2007), estes comutadores podem ser operados manualmente ou motorizados a partir do comando do relé regulador automático de tensão, comumente referenciado como relé 90, o qual atua

a partir da tensão de referência medida no lado secundário do transformador, ilustrado na Figura 2.1.

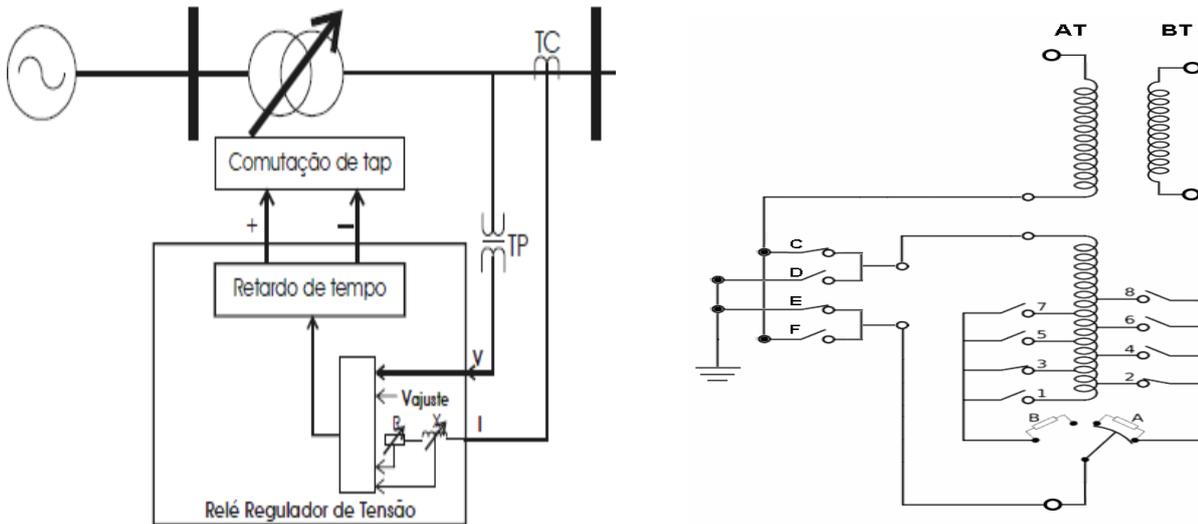


Figura 2.1 – Esquema simplificado de relé regulador de tensão
Fonte: Usida (2007).

As principais funcionalidades disponíveis no relé 90 são temporização, largura de faixa e insensibilidade, dada a importância destes parâmetros para o desenvolvimento deste trabalho, suas características serão aprofundadas em item específico. (SHORT, 2003).

Entre outras funções disponíveis no relé de controle de tensão estão as relacionadas ao bloqueio em situações anormais do sistema elétrico, tais como a proteção contra sobrecorrente, subtensão e sobretensão. Outras funcionalidades adicionais estão sendo incorporadas nos relé 90, como ajuste por faixa horária, operação em fluxo inverso e recurso de telecontrole e programação, tornando o controle *online* desses reguladores, conforme destacados por Miranda (2007), Spathi (2007), Usida (2007) e Bremermann (2008). Detalhes complementares estão apresentados em manuais de equipamentos como Tapeletro (2007), Thoshiba (2008), SEL (2010) e ITB (2011).

O ajuste da temporização exige que o especialista pondere a relação, largura da faixa versus regulação de tensão, por exemplo, a escolha de faixa estreita ou baixa temporização melhora o perfil de tensão, entretanto aumenta o número de comutações e acelera o desgaste. Para realizar este controle os relés reguladores de tensão são providos de contadores de operações.

2.3.4 Banco de regulador de tensão

O regulador de tensão é fundamentalmente um autotransformador que possui ajuste automático de TAPs, que através de um circuito de controle responsável pela comutação, permite elevar ou reduzir a tensão no seu lado secundário. Portanto, atua para compensar as variações da tensão no primário e manter a tensão no lado da carga dentro da faixa de valores pré-estabelecidos. (MAMEDE FILHO, 2005).

Diante da característica do território brasileiro, o uso destes equipamentos está difundido nos sistemas de distribuição, pois conforme a configuração do banco de reguladores e inversão das bobinas do secundário é possível elevar ou baixar a tensão por fase. Através de critérios de planejamento são definidos os locais onde devem ser alocados os reguladores de tensão, de forma a recuperar a queda de tensão na linha. Além da compensação, os ajustes adotados visam o estreitamento da faixa de manutenção dos níveis de tensão para valores próximos a tensão nominal (PEREIRA, P.R.S., 2009).

Quanto ao tipo de equipamento, os reguladores de tensão existentes são classificados como *Autobooster*, 32 degraus e *Line-Drop Compensation* (LDC). Destes, o mais utilizado nos sistemas de distribuição é o regulador de tensão de 32 degraus, já que atua como elevador e redutor de tensão e permite faixa de ajuste de aproximadamente $\pm 10\%$. Os esquemas das diversas combinações possíveis para ligação de reguladores estão apresentados em Mamede Filho (2005).

Referente aos arranjos de reguladores de tensão, as distribuidoras utilizam bancos com 2 ou 3 equipamentos monofásicos de 32 degraus, predominando o agrupamento de 3 unidades conectadas em triângulo ou estrela, por ser o tipo de ligação que fornece ajuste independente por fase. Os diferentes tipos de ligação apresentam vantagens e desvantagens, já que proporcionam ganhos distintos na faixa de regulagem da tensão. Uma síntese das especificações destacadas por Mamede Filho (2005) é apresentada através do Quadro 2.1.

CONEXÃO	REGULAÇÃO
Delta Fechado	$\pm 15\%$
Delta Aberto	$\pm 10\%$
Estrela	$\pm 10\%$

Quadro 2.1 – Comparação do Sistema Elétrico Atual e Futuro

Assim como nos relés reguladores de tensão presentes nos transformadores de potência das subestações, os reguladores de tensão são providos de relés de controle que permitem parametrizações do funcionamento, além de funcionalidades adicionais. (TAPELETRO, 2007; TOSHIBA, 2008; ITB, 2011).

Uma das preocupações relativa a otimização da operação dos reguladores de tensão é o número de comutações, pois o desgaste acelerado do comutador está associado ao volume excessivo de atuações do trocador de TAPs, conforme destacado por YE LI et al. (2011), Usida (2007), Spatti (2007) e Bremermann (2008).

2.4 Parâmetros para o controle de tensão

As funcionalidades mais importantes para parametrização de equipamentos de controle da tensão são: a tensão de referência, a insensibilidade e a temporização.

2.4.1 Tensão de referência

Tensão de referência é o valor desejado na saída do regulador ou em uma barra remota do alimentador, também apresentada como ponto de ajuste ou centro de banda. O relé do controle atua a partir do desvio verificado entre a amostra de tensão do lado da carga e a tensão de referência pré-estabelecida.

O ajuste do nível de tensão a ser mantida nos terminais de saída do regulador é obtido pela relação da tensão de referência multiplicada pela relação de transformação do regulador. (MAMEDE FILHO, 2005).

Os principais componentes de um equipamento regulador de tensão estão ilustrados no diagrama apresentado na Figura 2.2.

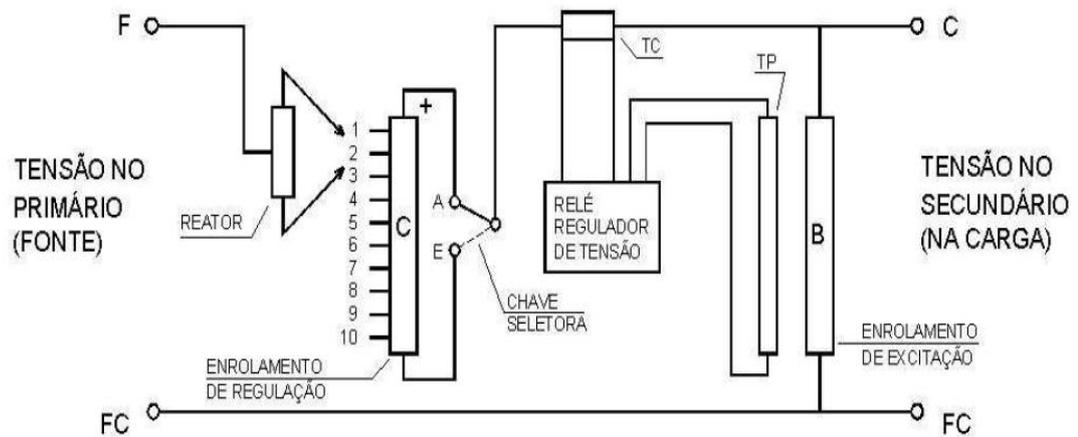


Figura 2.2 – Medição da tensão no lado da carga
 Fonte: Mamede Filho (2005)

2.4.2 Insensibilidade e temporização

Para evitar comutações de TAPs devidas a pequenas variações que não impactam o funcionamento das cargas e os índices regulamentados é determinada uma faixa de precisão que define a tolerância aceitável a partir da tensão de referência. Portanto, a largura desta faixa de variação é definida pelos limites adotados para a tensão mínima e máxima do regulador, ou seja, se a tensão de saída estiver dentro da faixa da tensão de referência \pm insensibilidade, não ocorre comutação de TAP's. (TOSHIBA, 2008; ITB, 2011).

Temporização é a funcionalidade utilizada para configurar o tempo de espera para iniciar a comutação a partir do instante em que a tensão extrapolou os limites estabelecidos. Este parâmetro também é referenciado como tempo de retardo ou tempo morto e a sua finalidade principal é evitar comutações desnecessárias em variações rápidas de tensão. (THOSHIBA, 2008, ITB, 2011).

Outra finalidade da temporização é possibilitar a coordenação entre dois ou mais equipamentos de controle de tensão ligados em cascata. A maioria dos controles dispõe de duas modalidades de temporização, sendo que o tempo linear é equivalente ao tempo de atuação selecionado para o ajuste e o tempo inverso é inversamente proporcional a variação da tensão de entrada do regulador. (THOSHIBA, 2008, SEL, 2010; ITB, 2011).

A Figura 2.3 ilustra a operação do comutador após a tensão de saída violar a banda mínima da faixa pré-estabelecida, isto é, tensão de referência \pm

insensibilidade. A temporização está caracterizada no intervalo entre o início da contagem de tempo e o início da comutação.

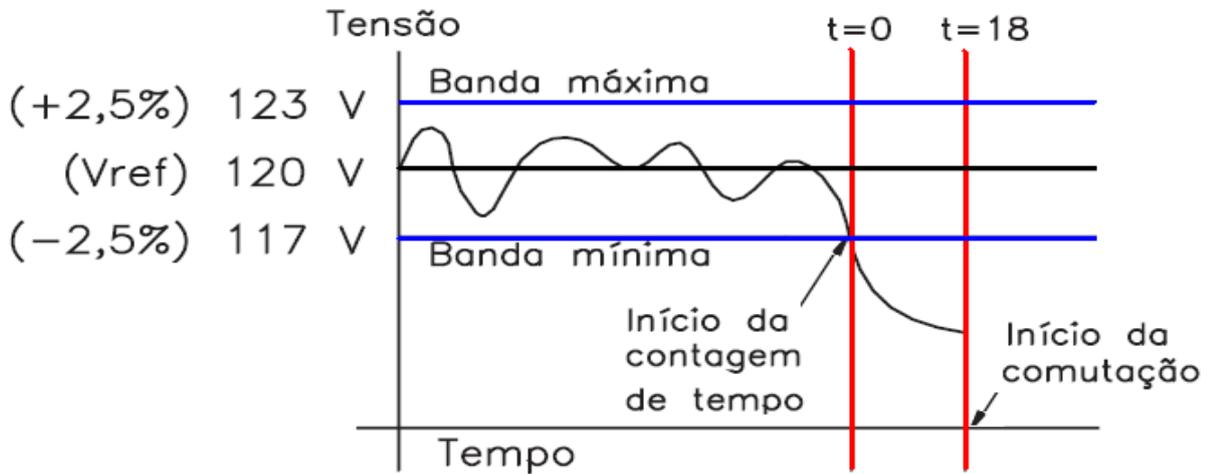


Figura 2.3 – Faixa de insensibilidade e temporização
Fonte: ITB (2011).

2.4.3 Compensação por queda de tensão na linha

A compensação por queda na linha é um recurso utilizado para simular a impedância na linha desde o banco de reguladores até o ponto distante definido para ter a tensão regulada. Este dispositivo simula as resistências e reatâncias da rede através da definição dos parâmetros UR e UX de maneira que a queda de tensão seja compensada nas suas componentes resistiva e reativa. (MAMEDE FILHO, 2005). Esta funcionalidade está ilustrada na Figura 2.4.

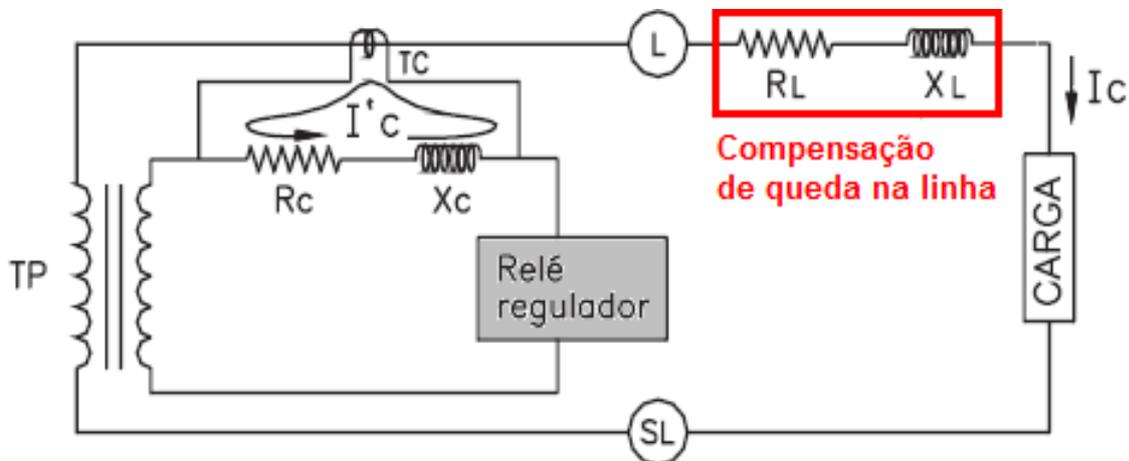


Figura 2.4 – Compensação de queda na linha
Fonte: ITB (2011).

Outras funções dos controles dos reguladores estão exemplificadas no Anexo A e exemplos de parâmetros de ajuste estão apresentados no Anexo B. Diante das mudanças vinculadas às redes inteligentes, neste trabalho são exploradas novas alternativas para ajuste de tensão nos sistemas de distribuição, portanto, a introdução de novas funções é fundamental para o bom desempenho do sistema no que se refere à qualidade da tensão.

2.5 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foi apresentado o estado da arte do controle de tensão nos sistemas de distribuição relacionando as alternativas para a manutenção dos níveis de tensão nos alimentadores. Também foram apresentados os principais equipamentos aplicados na regulação da tensão e os respectivos parâmetros disponíveis nestes dispositivos.

No próximo capítulo os conceitos das redes inteligentes são introduzidos através da automação da distribuição e relacionados à inteligência computacional aplicada no controle da tensão a partir das técnicas de previsão e tomada de decisão. Será abordada a qualidade da energia elétrica na perspectiva das redes inteligentes.

3 AS REDES INTELIGENTES E A QUALIDADE DA TENSÃO

Neste capítulo esta destacada a aplicação de inteligência computacional na operação do sistema elétrico de potência e a automação aplicada no progresso da qualidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

3.1 Automação dos sistemas de distribuição e as redes inteligentes

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) abrange a produção, a transmissão, a distribuição e a comercialização de energia elétrica. A partir da análise da cadeia de fornecimento que integra o SEP é possível identificar o grau de importância de cada seguimento, por conseguinte o nível de automação do sistema elétrico está relacionado à relevância dos equipamentos para o funcionamento do sistema. (NORTHCOTE–GREEN, 2007; RUSH, 2011).

Os sistemas de transmissão são providos de recursos avançados de supervisão e contingência. Já as redes de distribuição geralmente apresentam pouca ou nenhuma automação, deste modo, falta a integração das informações dos diversos componentes do sistema de distribuição. Por conseguinte, é oportuna a aplicação de inteligência nas redes de distribuição, conforme atualmente é discutido por diversas entidades. (ALCANTARA, 2010; ARAÚJO et al., 2011).

Embora a automação tenha ocorrido antes da introdução dos conceitos de redes inteligentes, atualmente ambos os temas estão em voga no cenário mundial através do processo de implantação da *smart metering* e *smart grid*. Esta relação é explorada por ARAÚJO et al. (2011), cujo trabalho abrange os conceitos, as inovações tecnológicas, os benefícios e os desafios relacionados a automação no âmbito das redes inteligentes.

Ainda referente a automação, Pereira (2010) desenvolveu trabalho sobre o monitoramento em tempo real da qualidade da tensão, o qual emite alarmes quando a tensão está fora da faixa de especificação. Porém, o sistema por si só não é capaz de assegurar a qualidade da tensão, pois as ações são corretivas e limitadas aos barramentos da subestação.

No que se refere ao controle da tensão no cenário das Smart Grids, Gao (2011) elaborou revisão bibliográfica sobre as tecnologias disponíveis nos sistemas

de distribuição e destacou as oportunidades para o ajuste de tensão a partir do monitoramento do sistema. Aplicação semelhante é apresentada em Rezende (2012) para o monitoramento da estabilidade da tensão através de Lógica Nebulosa.

No mesmo sentido, Ullo (2012) destaca as novas tendências no tratamento das informações relacionadas a qualidade da energia elétrica no cenário das redes inteligentes, cujos sensores instalados ao longo do sistema possuem capacidade de avaliar as principais variáveis monitoradas sem a dependência de um servidor central.

A automação na esfera das redes inteligentes compreende o emprego de funções avançadas na área de controle e operação do sistema em tempo real, como: detecção, isolamento e restauração de falta; monitoramento e controle de tensão; fluxo de potência; reconfiguração do sistema; análise de contingência; e previsão de carga. O

Quadro 3.1 traz uma comparação entre o cenário atual e futuro. (ARAÚJO et al., 2011; NORTHCOTE–GREEN, 2007).

ATUAL	FUTURO
Sistema Radial Passivo	Sistema Ativo Integrado a Geração Distribuída
Fluxo Estático Unidirecional de Energia	Fluxo dinâmico Bidirecional de Energia
Ajuste de tensão corretivo	Controle de tensão proativo
Operação em Malha Aberta	Operação em Malha Fechada
Proteção Simples não Direcional	Proteção Adaptativa Direcional
Automação Simples ou Ausente	Alto Grau de Automação
Comunicação Simples ou Ausente	Comunicação Bidirecional

Quadro 3.1 – Comparação do sistema elétrico atual e futuro

Os sistemas supervisórios atualmente utilizados são comumente denominados *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). Estes sistemas integram recursos computacionais e canais de comunicação dedicados ao gerenciamento de equipamentos de subestações e redes de distribuição. Porém no cenário das redes inteligentes serão ampliados os recursos de aquisição de dados, processamento em tempo real, gerenciamento dos ativos e integração de capacidade auto-regenerável. (ARAÚJO et al., 2011; NORTHCOTE–GREEN, 2007).

Neste processo de automação da distribuição são avaliados os principais pontos com potencial de telemetria, tais como reguladores de tensão, religadores

automáticos, chaves automatizadas, telemedição, sinalizadores de falta, consumidores do Grupo A, concentradores de BT, e num estágio mais avançado, os medidores de BT. (ROSA, 2010).

A Figura 3.1 ilustra a independência entre os equipamentos do sistema de distribuição convencional e a interação entre os dispositivos que integram uma Rede Inteligente.

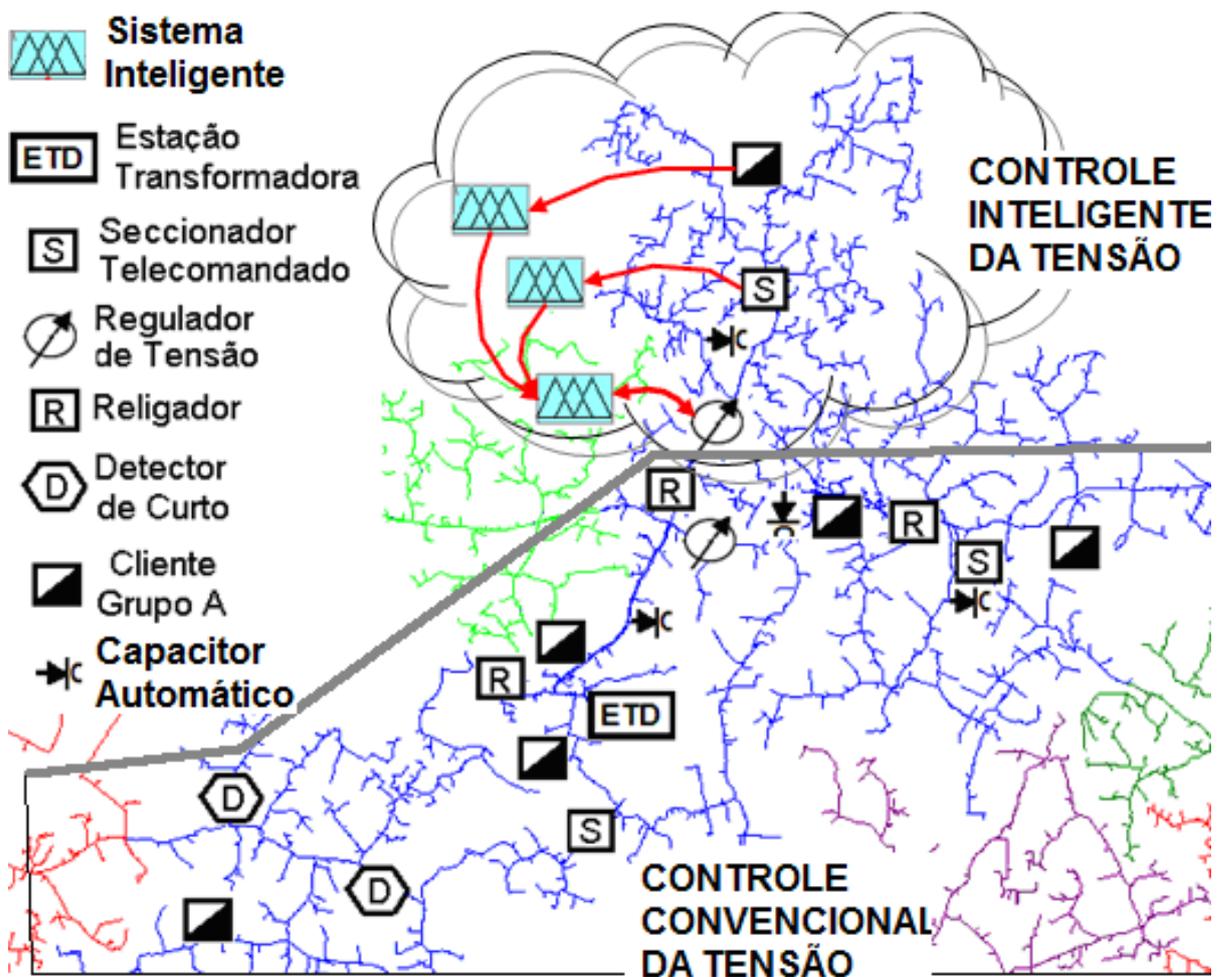


Figura 3.1 – Conversão das redes convencionais em redes inteligentes

A evolução das redes inteligentes está relacionada ao processo de integração de inteligência às subestações, redes de distribuição e medidores de BT (Baixa Tensão). Neste contexto, a consistência proposta pelos padrões internacionais no que se refere a protocolo de comunicação, assim como, os avanços tecnológicos dos dispositivos dedicados ao registro de grandezas proporcionam otimismo dos pesquisadores quanto ao progresso das redes inteligentes. (ARAÚJO et al., 2011; ZHABELOVA et al., 2012).

Na Figura 3.2 está ilustrada a abrangência da atuação de um regulador de tensão no cenário das redes inteligentes, o qual utiliza os dados de diferentes trechos do sistema como referência para o ajuste da tensão.

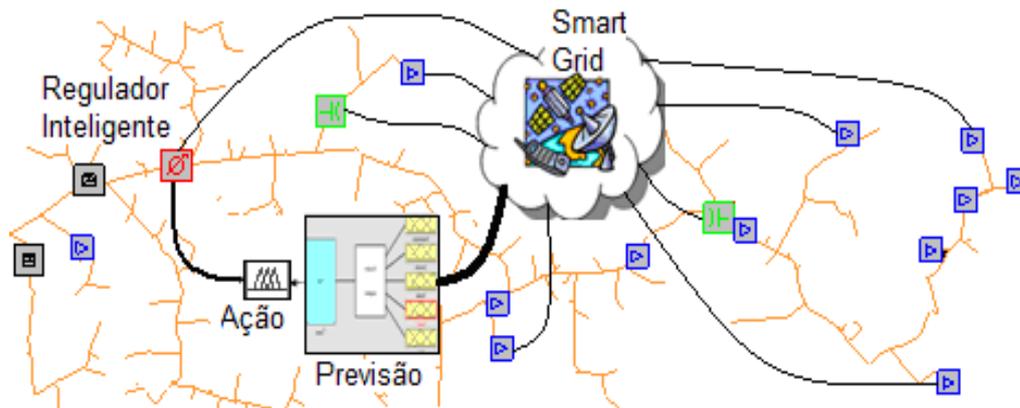


Figura 3.2 – Controle de tensão no cenário da redes inteligentes

A implantação das redes inteligentes consiste na agregação de tecnologia de ponta e modernas linhas de comunicação de dados às tradicionais redes elétricas. Os benefícios e desafios são imensos, já que o conceito de redes inteligentes abrange diferentes áreas como a ambiental, a econômica, a regulatória e a de segurança. Além disso, as redes inteligentes estão relacionadas à flexibilidade dos serviços, ao aumento da qualidade e a necessidade de custo altamente competitivo. (LIMA, 2011; WARMER, 2011).

As redes inteligentes abrangem a interação entre os diversos segmentos de um sistema elétrico, extensivo as residências providas de eletrodomésticos inteligentes que auxiliam os usuários na forma de uso eficiente da energia. (TIMPE et al., 2010; WARMER, 2011). Cabe as distribuidoras operarem o sistema de distribuição, controlarem o carregamento dos circuitos e interagirem com os clientes através da medição inteligente e tarifas horárias, conforme Lamin (2009) e Garcia (2010).

Na Figura 3.3 está representada a interação entre os diversos seguimentos que integram as redes inteligentes.

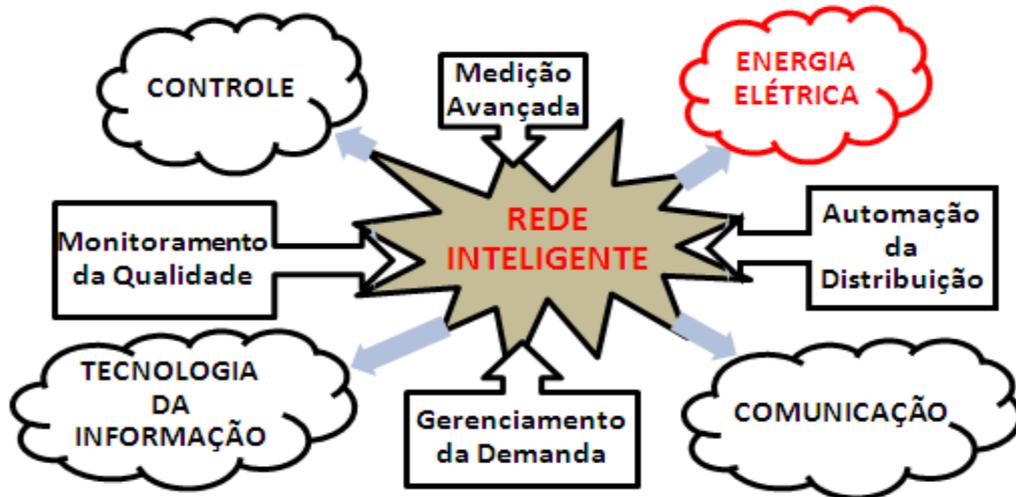


Figura 3.3 – Abrangência das redes inteligentes.

Neste cenário, também são tratadas a cogeração, a geração distribuída, a microgeração, os veículos elétricos e o armazenamento de energia. Na Figura 3.4 está representada a interligação entre os componentes do sistema elétrico no formato das redes inteligentes. (HAUTTEKEETE et al., 2010; BORBA, 2012).



Figura 3.4 – Representação dos componentes das redes inteligentes

Os trabalhos de Alcântara (2010) e Cunha (2011) trazem uma reflexão sobre os riscos e oportunidades relativas às redes inteligentes no Brasil. Neste sentido, destacam as ações da ANEEL, a qual realizou eventos relacionados a transmissão de sinais de comunicação pelas redes de distribuição, a medição eletrônica, a

estrutura tarifária e o pré-pagamento. Além da ANEEL, as distribuidoras de energia, os fabricantes, os órgãos de defesa do consumidor, universidades e pesquisadores estão envolvidos neste processo. (ALCÂNTARA, 2012; ANEEL, 2010a, 2010e).

Os medidores utilizados nas unidades consumidoras faturadas no Grupo A, geralmente registram os dados em intervalos pré-definidos, integralizados e armazenados na memória de massa não volátil, a partir da qual podem ser extraídos os dados necessários para o faturamento do ciclo, bem como analisadas grandezas elétricas como a corrente e a tensão. Porém, muitas vezes os instrumentos de medição utilizados são imprecisos e os parâmetros para o registro de tensão não são devidamente ativados. (GARCIA, 2010; LAMIN, 2009; WAKEFIELD et al., 2009).

De forma semelhante à telemetria dos sistemas de medição, outros equipamentos das redes de distribuição providos de automação registram eventos e armazenam dados na memória. Na visão das redes inteligentes estes pontos têm canal de comunicação bidirecional com a central de controle, transmitem as informações em tempo real e possuem funcionalidades dedicadas ao registro de tensão. (ANEEL, 2010e; ELBURG, 2010; ARAÚJO et al., 2011).

3.2 Controle inteligente de tensão

A inteligência computacional abrange sistemas com capacidade de emular a maneira como o cérebro humano resolve problemas, assim como a aptidão de aprendizado e descoberta do conhecimento. A inteligência também é atribuída à habilidade de tomada de decisão, explorando recursos computacionais como o aprendizado da máquina e sistemas especialistas. (AGUIAR, 2007).

Na área das ciências exatas é encontrada uma diversidade de pesquisas realizadas na busca das melhores técnicas de inteligência computacional para estimar o carregamento de sistemas elétricos. Em conjunto com os processos de mineração são explorados métodos e técnicas, como a análise de tendências, os sistemas especialistas, as Redes Neurais Artificiais (RNA), a Lógica *Fuzzy*, a modelagem matemática, os algoritmos evolutivos, entre outros sistemas de avaliação e tomada de decisão. (MASSELI, 2009).

Esta capacidade de descoberta esta embasada em regra heurística da forma:

SE <condição> ENTÃO <conclusão>

Em síntese, as RNA aprendem heurística a partir dos dados, já os sistemas difusos representam o conhecimento heurístico por meio das regras *fuzzy*. Estes fundamentos são abordados com maior ênfase no Apêndice A e no Apêndice B.

3.2.1 Sistemas inteligentes de previsão de tensão

O propósito da análise de séries temporais é identificar características dos dados e propor modelos para as séries. Conceitualmente uma série temporal é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo, assim, se aplica a diversos parâmetros do sistema elétrico, como os registros de tensão. A partir dos princípios estatísticos é possível obter previsões de valores futuros de uma série temporal, bem como identificar seu comportamento através da elaboração de gráficos, identificação de tendências, ciclos e variações sazonais, construção de histogramas e diagramas de dispersão. (CAMPOS, 2008; SILVA, 2012).

A Figura 3.5 apresenta o resultado de uma medição de tensão, através desta ilustração é possível verificar que ocorre variação da grandeza ao longo do tempo. Neste caso, é possível observar a transgressão dos limites da faixa adequada e o comportamento não linear da tensão.

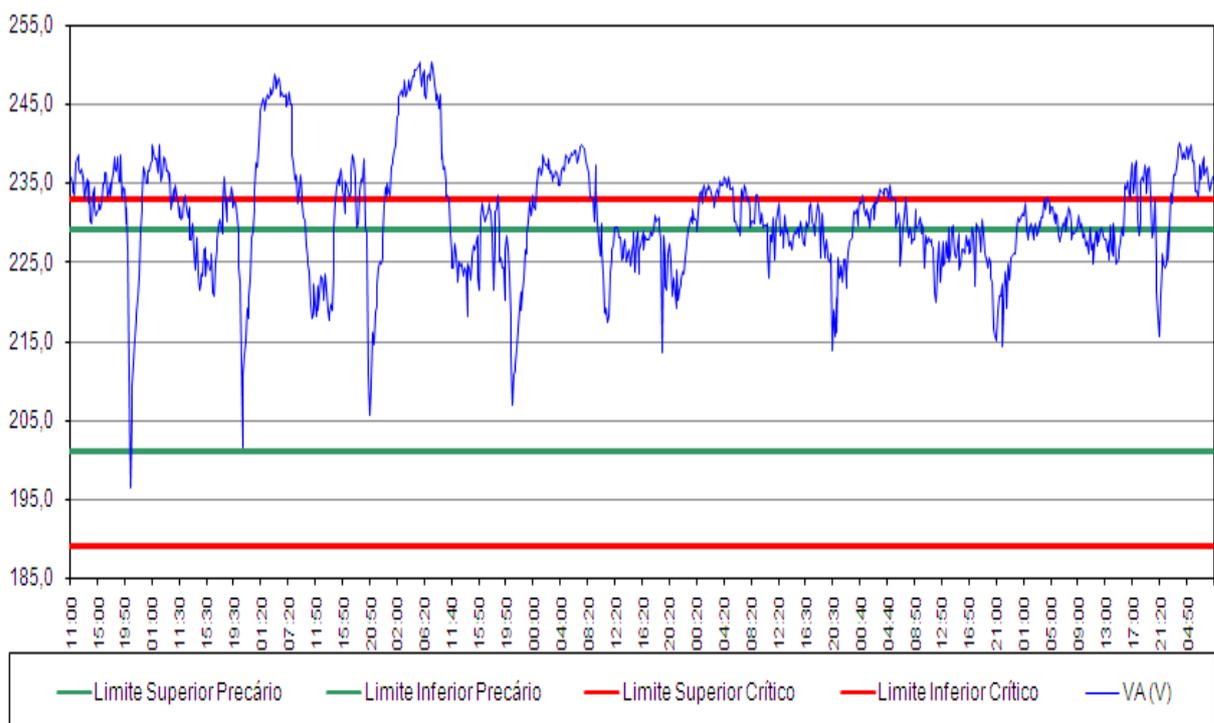


Figura 3.5 – Comportamento da tensão no tempo

A análise de tendências é uma forma simples de prospecção, já que é um método baseado na hipótese de que os padrões do passado serão mantidos no futuro. Nos conceitos da estatística clássica, previsão não define o resultado, portanto, no contexto deste trabalho é utilizada como um meio de fornecer informações para tomada de decisão. Maiores detalhes sobre séries temporais e conceitos intrínsecos podem ser consultados nas referências Devore (2011) e Campos (2008).

Na previsão de tensão é considerado o relacionamento entre carga, tempo, condições meteorológicas, dentre outras fatores que afetam o comportamento da tensão. Deste modo, busca-se identificar técnicas capazes de relacionar variáveis históricas, atuais e previstas, além da aptidão para o tratamento de informação não-linear. Diante da diversidade de grandezas envolvidas é necessário condensar as regras em um conjunto através de inferências, bem como aplicar técnicas de mineração de dados devido o volume de informações. (ANDRADE, 2010; MASSELLI, 2009).

Diferentemente da abundância de trabalhos relacionados à previsão de carga, os estudos relativos à previsão de tensão são mais raros. Porém, o tema já foi explorado anteriormente, como Belhadj (1998) e Bottura (2011) que propõem métodos baseados em RNA para estimação e monitoramento da tensão. A partir dos resultados obtidos os autores apontaram o potencial para aplicações em tempo real.

Como exemplo de trabalhos aplicados à estimação de tensão, Hiyama et al. (2005) indica um esquema para estimativa de tensão ao longo de alimentadores de distribuição a partir de dados da rede troncal atribuídos a equações nodais e sugere a aplicação do método para o controle de tensão *online*.

Neste mesmo sentido, Chessmore et al. (2009) desenvolveu um método para estimar o perfil de tensão de um alimentador radial utilizando número reduzido de pontos de monitoramento. Indicou ajustes com base na estimativa de tensão, previsão de carga e outras informações do sistema para operação conjunta de equipamentos reguladores de tensão e banco de capacitores.

O presente trabalho tem o objetivo de apresentar metodologia para análise e otimização dos níveis de tensão considerando o comportamento da carga, para tanto, é necessário escolher técnicas de previsão aplicáveis no cenário das redes inteligentes.

Masseli (2009) investiga as principais técnicas de inteligência artificial e a união delas em sistemas híbridos aplicados a modelagem e identificação de sistemas complexos e não-lineares. A aplicabilidade do processo de previsão foi testada para estimação de carga e entre outras técnicas aplicou redes neurais polinomiais e lógica difusa, combinados com a otimização por enxame de partículas.

Diante de poucos trabalhos direcionados à previsão de tensão, se propõe uma correlação a estudos de previsão de carga. Destarte, o estudo de Andrade (2010) destaca as variáveis relacionadas à previsão no curtíssimo prazo e aplica o Sistema de Inferência *Neurofuzzy* Adaptativo (ANFIS) para previsão de demanda. Através de revisão bibliográfica o autor destaca que os resultados obtidos através do método proposto foram promissores.

Contudo, as técnicas utilizadas para previsão devem preservar aspectos como: o baixo esforço computacional, a arquitetura versátil, a rapidez na apresentação do resultado e a eficiência na classificação de dados. Caso contrário, a aplicação destas técnicas para previsões no curtíssimo prazo pode ser comprometida. Além disso, a metodologia deve ser validada através da avaliação do índice de acerto relativo aos valores estimados e os verificados. (CAMPOS, 2008; ALBU et al., 2010).

Portanto, a recorrência a sistemas de Inteligência Artificial para realizar previsões está relacionada à sua capacidade de identificar padrões de comportamento em conjunto de dados históricos, conforme referenciado por Neusser (2012) e Silva (2012). Desta forma, as RNA possibilitam aproximações razoáveis para variáveis não-lineares e apresentam resultados admissíveis para tomada de decisão. Geralmente as previsões precedem o processo de tomada de decisão, o qual está relacionado à busca pela redução de incertezas sobre determinadas deliberações e a possibilidade de escolha razoável sobre as alternativas que estão disponíveis. (AGUIAR, 2007).

Tradicionalmente as aplicações de engenharia consideram apenas o conhecimento numérico, cujos dados são normalmente obtidos através de sensores que registram os valores de uma grandeza. Atualmente, com o avanço da inteligência computacional, outras formas de informações relacionadas ao conhecimento humano expressado nas variáveis linguísticas, passaram a incorporar a modelagem de sistemas. Diversas técnicas são aplicáveis para previsão e tomada de decisão, seja por métodos clássicos (heurística, estatística) ou não convencionais

baseados em inteligência artificial (sistemas especialistas, redes neurais, modelos nebulosos). (AGUIAR, 2007).

Entre as vantagens atribuídas aos métodos estatísticos está a fundamentação matemática bem desenvolvida, porém a complexidade relacionada à modelagem limita as aplicações práticas, principalmente para previsões em curto e curtíssimo prazo. Embora estes métodos ainda estejam sendo explorados nos estudos de previsão, na última década é crescente a aplicação de técnicas de Inteligência Artificial combinada com as técnicas estatísticas. (CAMPOS, 2008; DEVORE, 2011).

Os métodos de Inteligência Artificial se apropriam da estratégia de modelar o conhecimento humano em um programa computacional, procedimento conhecido como sistema especialista, assim como, aprender o comportamento de um sistema a partir de um histórico de dados, característica denominada de treinamento. Estes métodos não dependem de uma modelagem matemática complexa, mas dispõem da interpolação de informações. (RUSSELL et al., 2004).

Assim como os métodos matemáticos convencionais, os métodos baseados na Inteligência Artificial apresentam pontos fracos, como os relacionados à seleção de variáveis importantes para a previsão, a complexidade de codificar o conhecimento, a relevância dos dados para o sistema e a transparência nos processos de treinamento. (MASSELI, 2009).

Entre os principais métodos recorrentes as técnicas de Inteligência Artificial estão os Sistemas Especialistas, os Algoritmos Genéticos, as RNA e a Lógica *Fuzzy*. Porém, alternativamente a estes métodos, em previsões são aplicados métodos híbridos, os quais combinam recursos de diferentes técnicas para superar as dificuldades de cada uma e possibilitar melhor desempenho do sistema aliada a maior exatidão. Entre os métodos híbridos destaca-se o *Neurofuzzy*, já que este se apropria da aplicação de um modelo que agrega a tecnologia das RNA e Lógica *Fuzzy*, assim sendo, consolida um modelo de apoio a identificação de tendência e tomada de decisão. (AGUIAR, 2007; MASSELI, 2009).

A introdução das Redes *Neurofuzzy* supera o questionamento referente falta de transparência atribuída as RNA, uma vez que no *Neurofuzzy* é possível observar a relação entre variáveis de entrada e saída, analisar as funções de pertinência e as regras *fuzzy*. Neste modelo a etapa de treinamento é realizada preliminarmente – *offline*, já a etapa de diagnóstico pode ser realizada na aplicação em tempo real – *online*. (ANDRADE, 2010).

Com base na revisão bibliográfica apresentada, são aplicados os recursos das redes *Neurofuzzy* para a etapa de previsão que compõe a metodologia apresentada nesta dissertação. Complementarmente, no Apêndice B, estão referenciados os conceitos relativos ao ANFIS.

3.2.2 Sistemas inteligentes para avaliação da tensão

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

Para destacar a importância de técnicas aplicadas nos processos de avaliação e tomada de decisão, a seguir são referenciados trabalhos que aplicam métodos baseados na inteligência computacional como ferramenta de apoio operacional para o controle inteligente de tensão.

A inserção de módulos inteligentes nos relés reguladores de tensão é proposto por Spatti (2007) para flexibilizar o ajuste de tensão. Neste caso o regulador de tensão considera as variáveis elétricas do sistema e aplica Lógica *Fuzzy* para indicar modificação da tensão de referência. O estudo foi direcionado a subestações de distribuição e limitado a controle no barramento secundário. Através de resultados obtidos apresenta um ganho de tensão em diferentes patamares de carga.

Relé inteligente também é proposto por Usida (2007), cujo trabalho investiga os principais aspectos relacionados ao controle de tensão e apresenta estudo sobre melhoria do perfil de tensão através da comutação de TAP em transformadores de potência instalados em subestações de distribuição. A inteligência do relé regulador de tensão está baseada em sistemas *fuzzy* e a implementação foi realizada por meio de um algoritmo computacional no *Matlab*. Os resultados de aplicabilidade realizados consideraram diferentes patamares de carga.

A aplicação de Lógica *Fuzzy* para o controle de tensão é aplicado por Miranda et al. (2007), o qual descreve o conceito de um controlador de tensão VOLT/VAR,

que é baseado na interação de controladores *fuzzy* do tipo *Mamdani*. O ajusta da sensibilidade conforme perfil de carga e mantém a tensão dos barramentos dentro dos limites admissíveis.

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

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

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

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

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

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

As características da Lógica *Fuzzy* e do Sistema *Neurofuzzy* possibilitam afrontar a complexidade presente no processo de controle de tensão, principalmente

o tratamento dispensado às relações não-lineares. (SILER, 2005). Os blocos de tomada de decisão, que integram a metodologia proposta neste trabalho, aplicam os recursos da Lógica *Fuzzy*, a qual está referenciada no Apêndice A.

A revisão bibliográfica referente à Lógica *Fuzzy* e Sistema *Neurofuzzy* apresenta fundamentação consolidada e resultados promissores nas aplicações com informações classificadas como incertas, imprecisas, difusas, nebulosas, deste modo é aplicável nas situações em que a representação matemática do problema é complexa, pois com estas técnicas é possível realizar o mapeamento não-linear de um conjunto de dados quantitativos e qualitativos referentes as variáveis de entrada e saída, conforme aplicações realizadas por Masselli (2009) e Andrade (2010) e conceitos apresentados em Simões (2007) e Weber (2003).

3.3 Qualidade da tensão conforme PRODIST

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) comumente é dividido em geração, transmissão, distribuição e comercialização. No caso brasileiro a distribuição de energia elétrica é regulada como um serviço público, o qual é prestado pelas autorizadas, permissionárias e concessionárias. Diante da regularização do setor elétrico brasileiro o avanço da regulamentação evidenciou a complexidade das operações das redes de distribuição e revolucionou os procedimentos relacionados à qualidade de energia elétrica fornecida ao usuário final. (PINHEIRO, 2011).

Os fenômenos relacionados à tensão, corrente e frequência, que ocasione falha ou mau funcionamento dos equipamentos dos usuários são tratados através de indicadores de qualidade da energia elétrica. Por ser um assunto amplo, este tratamento geralmente distingue a qualidade da energia fornecida através de três segmentos: qualidade comercial ou atendimento, qualidade do produto e qualidade do serviço ou fornecimento. Maiores detalhes sobre os conceitos intrínsecos podem ser consultados nas referências ANEEL (2010c; 2010f) e Kagan (2009).

A qualidade do atendimento está relacionada a toda relação comercial entre a distribuidora e o usuário, principalmente no que se refere à solução de reclamações e execução dos serviços comerciais solicitados pelo consumidor. Atualmente a regulamentação apresenta indicadores comerciais, cuja violação implica em compensação diretamente na fatura da unidade consumidora. (ANEEL, 2010f; PINHEIRO, 2011).

A qualidade do serviço geralmente está relacionada à continuidade do fornecimento, isto é, trata das interrupções de funcionamento do sistema elétrico. A composição dos índices de continuidade regulamentados abrange detalhes relacionados ao tipo de evento. (ANEEL, 2010c; KAGAN, 2009, KNAK NETO, 2012).

A qualidade do produto se caracteriza pela forma da onda da tensão fornecida à unidade consumidora. Para o entendimento do comportamento da tensão é necessário analisar uma diversidade de fenômenos, neste sentido, se evidencia a complexidade no monitoramento e a dificuldade de fornecer energia elétrica adequada. Os principais distúrbios atrelados ao produto são normalmente referenciados à duração do fenômeno, isto é, variação de curta ou longa duração. (KAGAN, 2009; MARTINHO, 2009).

A relação dos principais distúrbios relativos à tensão, tais como: o desequilíbrio, a flutuação, a variação de curta e longa duração, a variação de frequência e os harmônicos, estão ilustrados na Figura 3.6. (MARTINHO, 2009; ANEEL, 2010c).

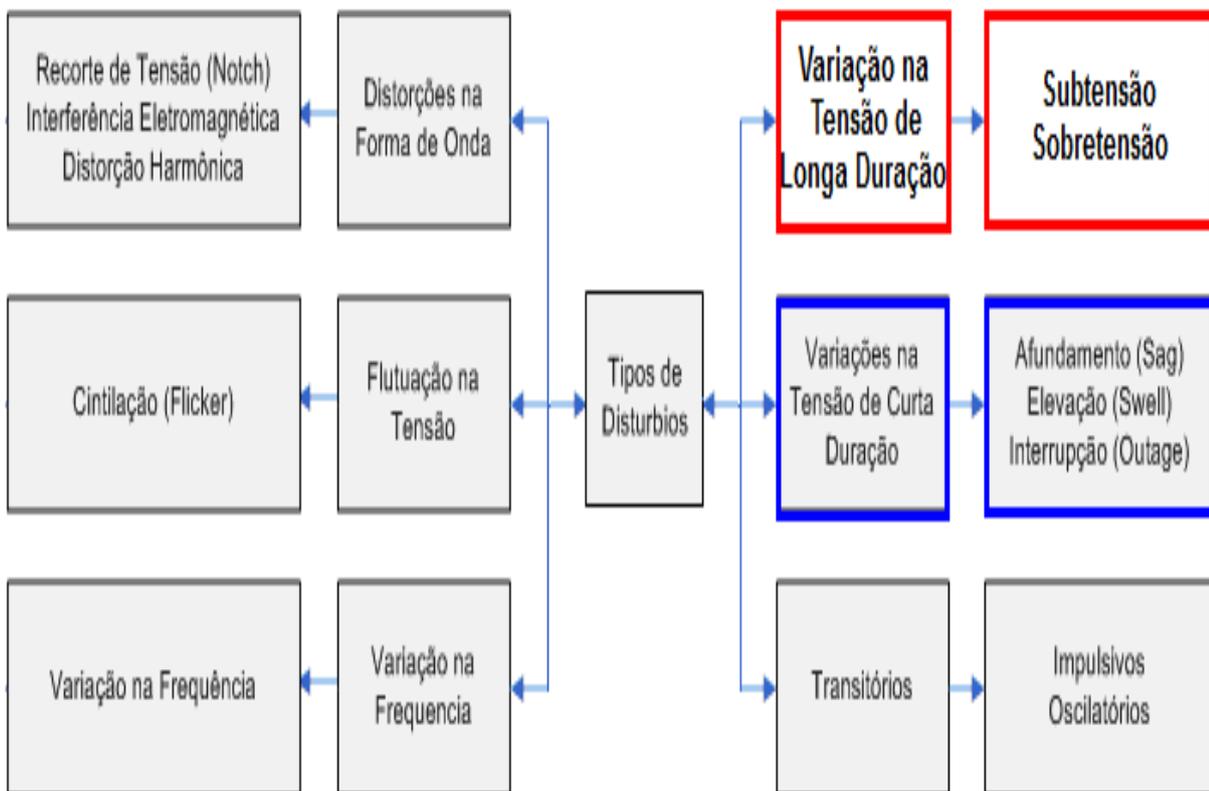


Figura 3.6 – Distúrbios da energia elétrica

O histórico do tratamento regulatório dispensado a qualidade da tensão é resgatado por Jannuzzi (2007). Neste sentido, a evolução da regulamentação também é mostrada em Bomfim (2008) e Bernardes (2011), cujos trabalhos destacam os aspectos relativos à obrigatoriedade da distribuidora fornecer tensão dentro dos limites adequados, a metodologia de compensação e a redução da assimetria de informação do processo.

A ANEEL, através do Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica do PRODIST, especifica os limites e estabelece diretrizes para a qualidade do produto no regime permanente. As classificações dos principais distúrbios relacionados à variação de tensão de curta duração estão apresentadas no Quadro 3.2. (ANEEL, 2010c).

CLASSIFICAÇÃO	DENOMINAÇÃO	DURAÇÃO	AMPLITUDE
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção	<=3 segundos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento	1 ciclo >= e <=3 segundos	0,1>= e <0,9 p.u.
	Elevação	1 ciclo >= e <=3 segundos	Superior a 1,1 p.u.
Variação Temporária de Tensão	Interrupção	3 segundos > e <3 minutos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento	3 segundos > e <3 minutos	0,1>= e <0,9 p.u.
	Elevação	3 segundos > e <3 minutos	Superior a 1,1 p.u.

Quadro 3.2 – Classificação das variações de tensão de curta duração

Apresentada a diversidade de fenômenos relacionados à tensão, neste trabalho, a partir do comportamento da tensão temporária é dado enfoque aos elementos relacionados à tensão no regime permanente, a qual é referenciada como Variação de Tensão de Longa Duração alternativamente denominada variação de tensão sustentada.

Neste módulo do PRODIST também estão apresentadas as expressões alternativas, reproduzidas nas equações 1 e 2, para apuração do percentual do desequilíbrio a partir dos valores medidos entre fases.

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{\sqrt{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}} \quad (1)$$

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \text{ e } FD\% = 100 \cdot \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2)$$

Em que:

FD: Fator de desequilíbrio

V₋: Magnitude da tensão de sequência negativa (RMS)

V₊: Magnitude da tensão de sequência positiva (RMS)

*V*_{ab}, *V*_{bc}, *V*_{ca}: Magnitude das tensões trifásicas de linha (RMS)

No PRODIST estão estabelecidas as faixas de classificação de tensões em regime permanente e os procedimentos para identificar a conformidade da tensão elétrica. A Quadro 3.2 mostra os limites das categorias: adequada, precária e crítica, para tensão de atendimento das unidades consumidoras conectadas na rede secundária com tensão nominal de 380/220V. A tensão de atendimento é o valor da tensão fornecida no ponto de conexão, cuja medição geralmente é efetuada por registrador de grandezas. (ANEEL, 2010c).

CATEGORIA DE TA	FAIXA DE VARIAÇÃO DE TL EM RELAÇÃO À TR
Adequada	(348 ≤ TL ≤ 396) / (201 ≤ TL ≤ 231)
Precária	(327 ≤ TL < 348 ou 396 < TL ≤ 403) / (189 ≤ TL < 201 ou 231 < TL ≤ 233)
Crítica	(TL < 327 ou TL > 403) / (TL < 189 ou TL > 233)

Quadro 3.3 – Tensão nominal igual ou inferior a 1kV. Rede de BT (380/220V)

Em que:

TL: Tensão de Leitura é o valor da tensão integralizada no intervalo regulamentado, conforme registro de equipamento apropriado.

TR: Tensão de Referência é o valor eficaz da tensão estabelecida em contrato para o ponto de conexão, ou ainda, a tensão nominal de operação do sistema.

A Figura 3.7 ilustra as faixas reguladas em relação à tensão de referência, para redes de BT. Neste caso, as faixas precárias e críticas são especificadas em relação à faixa adequada, tanto para os limites de valores superiores como para os valores inferiores.

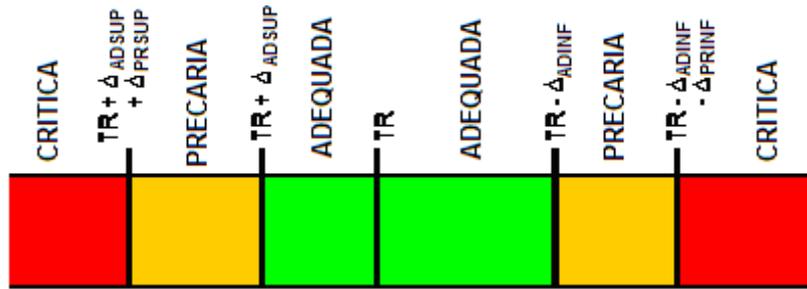


Figura 3.7 – Faixas de tensão em relação à referência

Em que:

T_R – Tensão de Referência;

Δ_{ADSUP} – Variação da faixa adequada superior;

Δ_{PRSUP} – Variação da faixa precária superior;

Δ_{ADINF} – Variação da faixa adequada inferior;

Δ_{PRINF} – Variação da faixa precária inferior.

Faixa Adequada de Tensão ($T_R - \Delta_{ADINF}$, $T_R + \Delta_{ADSUP}$)

Faixas Precárias de Tensão ($T_R + \Delta_{ADSUP}$, $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$, $T_R - \Delta_{ADINF}$)

Faixas Críticas de Tensão ($>T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $<T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$)

Quadro 3.4 traz os limites em p.u. relativos aos clientes atendidos em média tensão, superior a 1kV e inferior a 69kV. Esta faixa de tensão de atendimento abrange as unidades consumidoras do Grupo A4 conectadas nos sistema de distribuição.

CATEGORIA DE TA	FAIXA DE VARIAÇÃO DE TL EM RELAÇÃO À TR
Adequada	$0,93 TR \leq TL \leq 1,05 TR$
Precária	$0,90 TR \leq TL < 0,93 TR$
Crítica	$TL < 0,90 TR$ ou $TL > 1,05 TR$

Quadro 3.4 – Pontos de conexão em média tensão

Em que:

TL : Tensão de Leitura

TR : Tensão de Referência

A Figura 3.8 ilustra as faixas de variação em p.u. da Tensão de Leitura em relação à Tensão de Referência para conexões em tensão nominal de 13,8 kV e 23,1 kV.

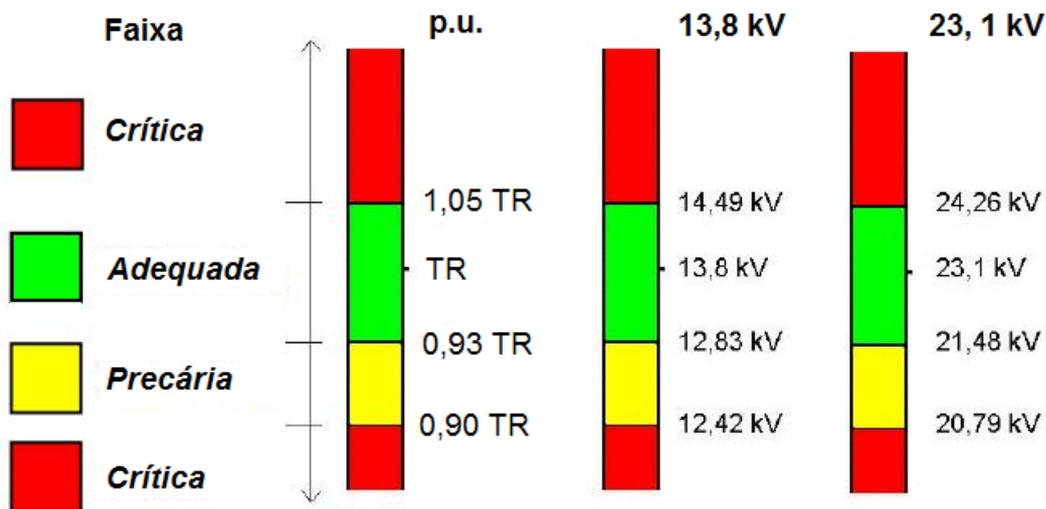


Figura 3.8 – Faixas regulamentadas para Média Tensão.

Conforme Módulo 8 do PRODIST, os indicadores regulamentados são elaborados com base nas faixas de tensão admissíveis e estão divididos em individuais e coletivos. Para obter os índices são necessárias 1008 leituras válidas consecutivas, as quais são apuradas através da aplicação de equipamento registrador de grandezas elétricas, que coleta amostras da onda de tensão em janelas sucessivas, numa sequência de 0,2 a 0,25 segundos (doze a quinze ciclos). Os valores eficazes da tensão devem ser apurados a partir da integralização destes registros em períodos de minutos, usualmente 10 minutos.

Foram regulamentados indicadores que representam a duração relativa de transgressão por faixa, que indicam respectivamente o percentual do tempo em que os níveis de tensão estiveram na faixa precária e na faixa crítica. A Equação 3 é utilizada para apurar estes indicadores.

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100[\%] \text{ e } DRP_E = \sum \frac{DRP_i}{N_L} [\%] \quad (3)$$

Em que:

DRP: índice de duração relativa da transgressão para tensão precária.

nlp : representa o maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa precária, respectivamente.

DRP_i : duração relativa de transgressão de tensão precária individual da unidade consumidora (i).

DRP_E : duração relativa de transgressão de tensão precária equivalente.

NL : número total de unidades consumidoras da amostra.

O maior DRP , ou seja, o valor da Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Precária – $DRPM$ estabelecido pelo órgão regulador é 3% (três por cento). Estes indicadores são apurados através da Equação 4.

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100[\%] \quad \text{e} \quad DRC_E = \sum \frac{DRC_i}{N_L} [\%] \quad (4)$$

Em que:

DRC : índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica.

nlc : representam o maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa crítica.

DRC_i : duração relativa de transgressão de tensão crítica individual da unidade consumidora (i).

DRC_E : duração relativa de transgressão de tensão crítica equivalente;

NL : número total de unidades consumidoras da amostra.

O valor da Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Crítica – $DRCM$ fica estabelecido em 0,5% (cinco décimos por cento).

A Equação 5 é apresentada no PRODIST para o cálculo do ICC.

$$ICC = \frac{NC}{NL} \cdot 100[\%] \quad (5)$$

Em que:

ICC : Índice de Unidades Consumidoras com Tensão Crítica.

NC : total de unidades consumidoras com DRC não nulo.

NL : total trimestral de unidades consumidoras objeto de medição.

Diante dos recentes ajustes nos mecanismos regulatórios relativos à qualidade do produto, as distribuidoras ainda estão adequando seus procedimentos relativos à conformidade da tensão em regime permanente. A ANEEL ainda não publica relatórios dos montantes compensados por transgressão dos níveis de tensão, porém mesmo com a existência de assimetria de informações o volume de violações identificadas é significativo. (ANEEL, 2012b; SRD, 2012).

3.4 Qualidade no cenário das redes inteligentes

A partir das redes inteligentes, além das inovações previstas para operação do setor elétrico de potência, as distribuidoras buscam alternativas para melhorar a qualidade do produto. (CORMANE, 2011; MACBEE, 2012).

Atualmente as medições de tensão são realizadas pelas distribuidoras para atender as reclamações dos consumidores ou para campanha de medição amostral definida pelo órgão regulador. Nestes casos, quando a qualidade da energia elétrica fornecida transgredir os limites estabelecidos a compensação é realizada diretamente na fatura do usuário. (KAGAN, 2009; ANEEL, 2010c).

Diante da implantação das redes inteligentes a qualidade da tensão passa a ter um novo enfoque, pois o órgão regulador tem possibilidade de aprimorar significativamente sua atividade fiscalizatória e o usuário tem acesso ao valor da tensão em tempo real. (CORMANE, 2011). Este avanço se deve as funcionalidades disponíveis nos medidores inteligentes instalados nas unidades consumidoras, ou seja, o sistema de medição é capaz de mensurar a tensão, indicar a leitura da tensão instantânea e apurar a transgressão da faixa de tensão. (ANEEL, 2010e; GARCIA, 2012a).

39. Entende-se que o sistema de medição instalado deve ser capaz de mensurar, de forma direta ou indireta, as seguintes grandezas:

1. Tensão: valor eficaz instantâneo;
2. Apuração de duração de transgressão de tensão: devem ser apurados os parâmetros para efeito de cálculo de Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária – DRP e de Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica – DRC. (ANEEL, 2010e).

Deste modo, haverá um acréscimo no monitoramento da qualidade, já que a tecnologia aplicada permite a interatividade do usuário e possibilita que o órgão regulador seja mais atuante na realização de atos regulatórios, uma vez que ocorre

aumento dos dados disponíveis e diminuição na assimetria de informações, conforme análise do impacto regulatório da implantação apresentado por ANEEL (2010e). No Anexo C estão ilustradas as etapas do processo, o qual é conduzido pela distribuidora.

Entre as alterações regulatórias possíveis neste novo cenário pode ser citada a mudança do período de amostras, redução do tempo de integração das leituras e a criação de índice para avaliar os intervalos ininterruptos com valores de tensão fora da faixa adequada, de acordo com Rocha et al. (2009) e Garcia (2012b). Também pode ocorrer a introdução de novos indicadores coletivos e modificações nos critérios das medições amostrais. (ANEEL, 2010e; KAGAN, 2009).

Por sua vez, as distribuidoras precisam se preparar para este cenário, de maior rigor regulatório relativo aos índices de qualidade e a possibilidade do aumento das reclamações dos consumidores. Isto ocasiona acréscimo de identificação de transgressões de tensão e aumento da possibilidade de violação dos indicadores. Neste sentido as distribuidoras necessitam identificar novas alternativas para atender os atos regulatórios e a expectativa de seus clientes, além de explorar as oportunidades de otimização dos processos relativos ao controle de tensão nos sistemas de distribuição, ao ganho de faturamento e ao controle das perdas. (GARCIA, 2012a).

O processo de apuração de indicadores consiste na estimação de índices para avaliar o desempenho a partir de diferentes metodologias. O tratamento dos eventos ocorridos em um determinado período pode ser estimado a “*priori*” ou “*posteriori*”, conforme melhor se aplica. Apesar da agência reguladora atualmente acompanhar o desempenho da distribuidora através de indicadores a “*posteriori*”, no cenário das redes inteligentes as ações podem ser antecipadas a partir da estimação de indicadores a “*priori*”. (KAGAN, 2009; GARCIA, 2012b).

Desta forma a distribuidora pode evitar transgressões que no modelo convencional seriam identificados somente após as ocorrências. Para prever a qualidade do produto, no que se refere aos níveis de tensão no regime permanente se propõe monitorar o sistema de distribuição através de pontos de medição ao longo do alimentador. (COLNAGO et al., 2010; MACBEE et al., 2012).

Diante do desafio de manter os índices de qualidade adequados, este trabalho, apresenta metodologia para o controle da tensão a partir de técnicas de previsão e tomada de decisão. A aplicação destes recursos está relacionada às

ações proativas que as redes de distribuição munidas de inteligência possibilitam, neste caso, ponderando os índices de qualidade com o objetivo de prever e corrigir as transgressões de tensão.

Neste trabalho são propostas alternativas para o controle de tensão a fim de atender os indicadores vigentes, bem como ampliada à análise para o cenário das redes inteligentes.

3.5 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo os conceitos das redes inteligentes foram introduzidos através da automação da distribuição e relacionados à inteligência computacional aplicada no controle da tensão a partir das técnicas de previsão e tomada de decisão. Neste contexto, foram referenciados trabalhos que abordam alternativas para o controle da tensão, assim, destacam a relevância do tema para os agentes do setor elétrico.

Este capítulo trouxe também os aspectos regulatórios relacionados à qualidade da energia, com enfoque nos indicadores relativos à tensão no regime permanente. A partir da síntese sobre redes inteligentes foram destacadas as oportunidades para o avanço da qualidade da tensão neste cenário.

A metodologia desenvolvida nesta dissertação inova na forma de empregar a previsão de tensão integrada ao controle inteligente para tomada de decisão em tempo real.

O próximo capítulo traz detalhes da metodologia aplicada na busca de alternativas para o controle de tensão no cenário das redes inteligentes e as características adotadas neste estudo.

4 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

4.1 Introdução

A metodologia apresentada é aplicável no cenário das redes inteligentes, no qual se considera um elevado grau de automação dos equipamentos instalados nos sistemas de distribuição. O potencial da telemetria é explorado para identificar novas funcionalidades a partir dos sistemas inteligentes dedicados ao controle do perfil de tensão. Em complemento aos estudos referenciados, o proposto na metodologia apresentada nesta dissertação é extensiva à implementação de novas funcionalidades nos dispositivos de controle de tensão.

Para tanto, propõe-se o monitoramento do sistema de distribuição através de pontos de medição de grandezas distribuídos ao longo do alimentador. A partir dos dados registrados nestes pontos, a metodologia desenvolvida realiza a previsão de tensão e indica ação para manter a tensão nos limites adequados. Desta forma, a atuação dos dispositivos de ajuste de tensão considera diferentes trechos do alimentador, por conseguinte, podem ser evitadas transgressões de tensão que no modelo convencional seriam identificados somente após as ocorrências.

Na Figura 4.1 está ilustrada a aplicação da metodologia desenvolvida através da interação entre um equipamento regulador de tensão e o controle inteligente.

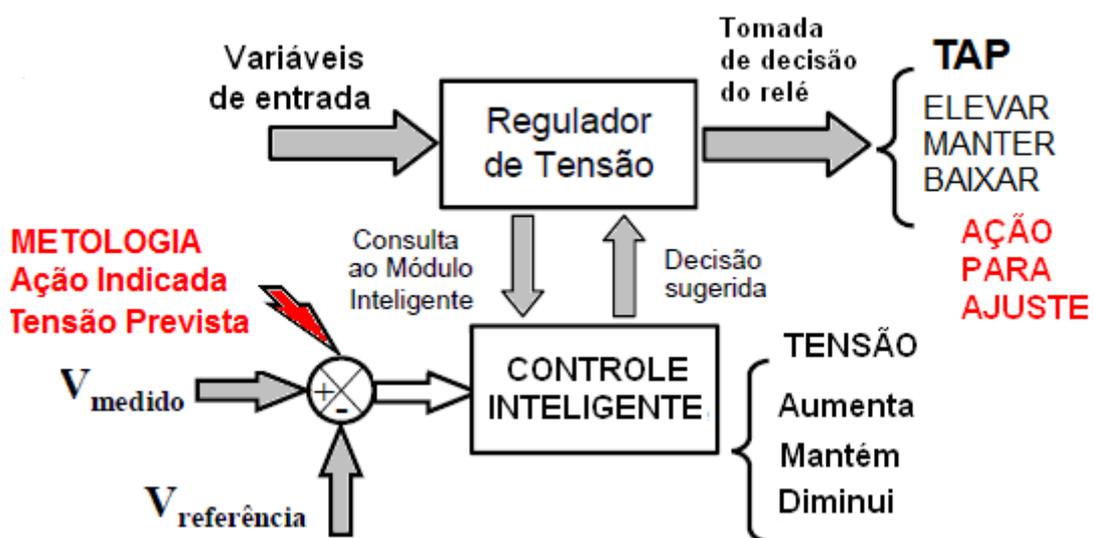


Figura 4.1 – Esquema de relé regulador de tensão com módulo inteligente

Conforme observa-se no esquema apresentado na Figura 4.1, a tensão prevista para o ponto de monitoramento e a ação indicada pela metodologia são utilizadas como variáveis de entrada para o controle inteligente. Este dispositivo pondera as informações disponibilizadas pela metodologia e os parâmetros do equipamento regulador de tensão para definir as operações necessárias para o ajuste da tensão.

A metodologia desenvolvida consiste na aplicação de sistemas nebulosos, como a Lógica *Fuzzy* e Redes Neurais Artificiais (RNA). Neste sentido, serão explorados os recursos do sistema *Neurofuzzy*, já que este se apropria da aplicação de um modelo que agrega os recursos das RNA à Lógica *Fuzzy*. Portanto, foi desenvolvido um modelo que realiza previsão de tensão e possibilita tomada de decisões visando à melhoria da qualidade da energia elétrica distribuída. Como os modelos *Neurofuzzy* comportam entrada de dados quantitativos e qualitativos, estrutura-se uma ferramenta importante para o processamento de informações dedicadas à previsão de tensão no curtíssimo prazo.

A metodologia apresentada pondera as principais funções relativas ao controle de tensão. A compensação de queda de tensão na linha pode ser substituída por pontos de monitoramento. Para obter a previsão de tensão em diferentes trechos do alimentador, a metodologia deve ser aplicada nos equipamentos do sistema de distribuição que são relevantes para o controle da tensão. A faixa de tensão regulada é utilizada em correlação a tensão de referência e insensibilidade. Também são propostos indicadores para atuar de forma análoga a temporização.

4.2 Detalhe da metodologia desenvolvida

Na previsão de tensão são aplicados os recursos do Sistema *Neurofuzzy*, baseados nas variáveis de entrada relativas às grandezas elétricas e meteorológicas.

A técnica de inteligência computacional adotada para os blocos de tomada de decisão está fundamentada na parametrização de índices regulados e inferência do especialista. Para a ponderação entre dados históricos e previstos é aplicada a Lógica *Fuzzy*.

A Figura 4.2 traz o diagrama da metodologia desenvolvida para análise de tensão em cada fase, a qual é composta de blocos que relacionam os dados qualitativos e quantitativos das variáveis de entrada e saída.

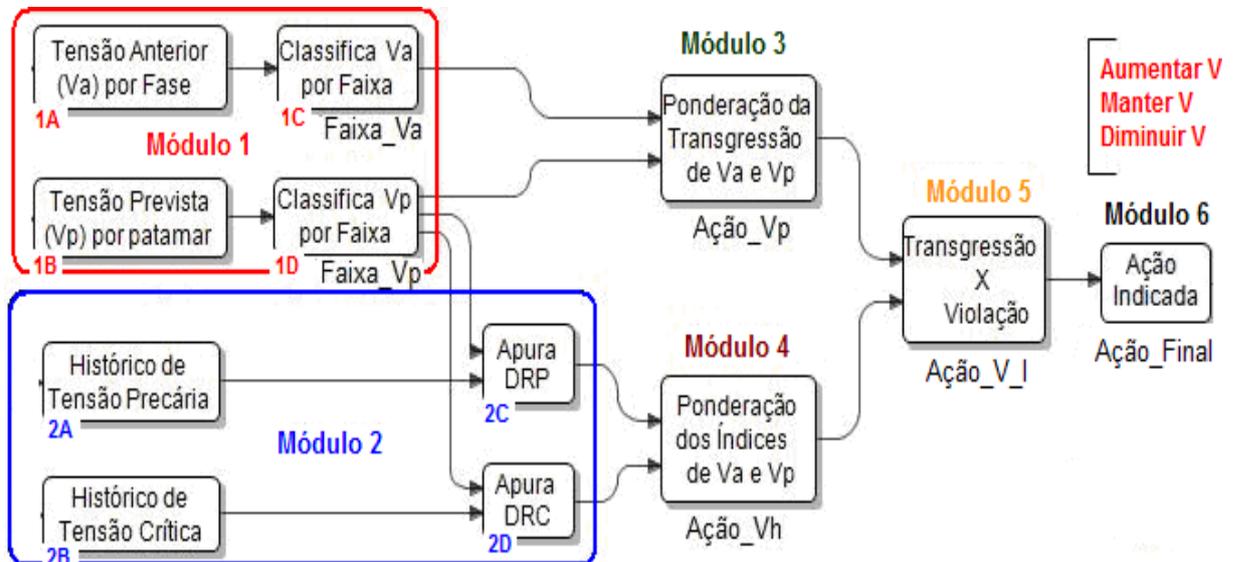


Figura 4.2 – Diagrama da metodologia por ponto e por fase

4.2.1 Detalhamento do diagrama da metodologia

Para facilitar o entendimento da metodologia, o diagrama apresentado na Figura 4.2 está detalhado através de módulos. A tensão é avaliada no primeiro módulo. O valor da tensão anterior, equivalente ao último valor registrado, está no bloco 1A e o valor de tensão prevista está no bloco 1B. Nos blocos 1C e 1D os respectivos valores de tensão são classificados conforme as faixas adequada, precária e crítica.

No módulo 2, são avaliados os indicadores de qualidade, isto é, a quantidade histórica de leituras de tensão nas faixas precária e crítica são consideradas na metodologia através dos blocos 2A e 2B. O índice relativo à tensão prevista também compõem a análise através dos blocos 2C e 2D.

No terceiro módulo, a faixa relativa à tensão histórica e a faixa relativa à tensão prevista são ponderadas para considerar a transgressão da faixa adequada. De forma equivalente, no quarto módulo, são feitas as ponderações referentes aos índices adotados na metodologia para avaliar a duração relativa de transgressão precária e crítica.

No módulo 5 são ponderadas as saídas referentes à transgressão da faixa de tensão regulada e a violação dos indicadores adotados na metodologia. No último módulo, estão as saídas da etapa referente à tomada de decisão final, isto é, a ação indicada pela metodologia referente à fase em análise.

Os blocos apresentados no diagrama da metodologia estão detalhados nos itens relativos à etapa de previsão de tensão, indicadores considerados na metodologia e nos sistemas para tomada de decisão. Visando a transparência e simplicidade da metodologia, optou-se pela tomada de decisão a cada par de blocos *fuzzy*. Neste sentido, procurou-se limitar as variáveis de saída dos controles *fuzzy* em até quatro opções.

Estas medidas tomadas na implementação da metodologia reduzem o número de regras por bloco e possibilitam a análise detalhada dos especialistas sobre a relevância de cada variável, desta forma, permitindo a reprodutibilidade da metodologia apresentada. O Apêndice C traz o diagrama de implementação da metodologia no *Simulink*.

4.2.2 Previsão da tensão

Semelhante as projeções de demanda de energia elétrica, as previsões de tensão são realizadas para diferentes horizontes de interesse. Embora existam abordagens diferentes entre autores, no intuito de conceituar os tipos de previsão em relação ao tempo, comumente são apresentadas quatro categorias. No longo prazo estão inseridas as projeções realizadas para períodos de anos. De modo semelhante o médio prazo contempla intervalos de tempo de um até vários meses a frente. Já o curto prazo relaciona os períodos de dias a semanas a frente. (ANEEL, 2010a). Previsões precisas e em tempo real são essenciais para a operação eficiente e confiável do sistema elétrico, assim a previsão no curtíssimo prazo abrange as projeções com periodicidade de alguns minutos até poucas horas. (CAMPOS, 2008; ANDRADE, 2010).

No PRODIST, as variações de tensão com duração menor que 3 minutos são classificadas como variação de tensão temporária, porém os módulos deste regulamento não tratam de terminologia referente a horizontes de previsão menores que um dia. Nesta dissertação é indicado o valor previsto para a tensão no minuto seguinte em correlação ao conceito de horizonte de previsão um passo à frente,

conforme apresentado no Quadro 4.1. Assim, adota-se o termo previsão de tensão no curtíssimo prazo.

GRANDEZA DE ENTRADA	HORÁRIO (HH:MM)	SAÍDA DESLOCADA	HORÁRIO (HH:MM + 00:01)
V0	00:00	V1	00:01
V1	00:01	V2	00:02
V2	00:02	V3	00:03
V3	00:03	V4	00:04

Quadro 4.1 – Representação da saída um passo a frente

Como a metodologia apresentada trata de método alternativo para fins de manutenção dos níveis de tensão, foi adotado este horizonte de previsão para viabilizar a tomada de ações proativas, em correlação ao tempo de comutação, temporização e insensibilidade.

As amostras históricas e previstas das variáveis utilizadas na metodologia são ordenadas no tempo, cuja característica é comumente chamada de “janela de tempo”. Neste sentido, também foi definido o período de predição, chamado de “horizonte de previsão”, o qual referencia o tempo futuro a que o valor previsto se refere. A Figura 4.3 ilustra o comportamento da janela de tempo e do horizonte de previsão.

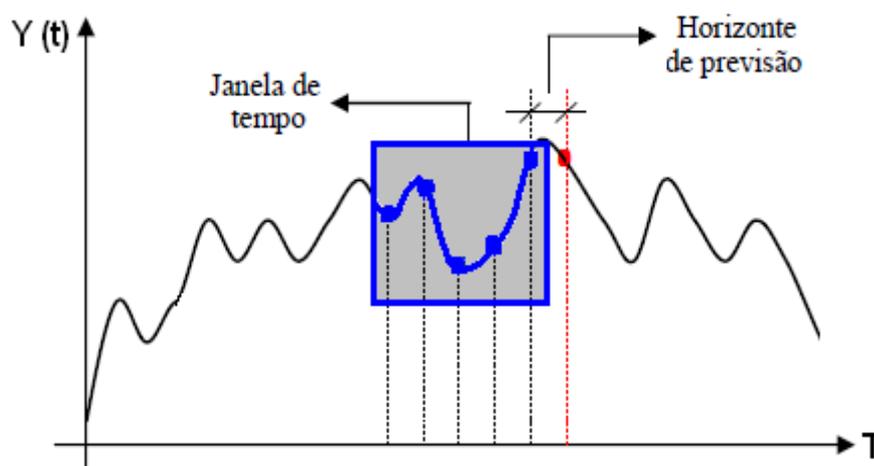


Figura 4.3 – Demonstração da janela de tempo e horizonte de previsão

A escolha das variáveis de entrada e saída são fundamentais para definição do modelo, porém esta relação não é consenso entre os especialistas, o que

aumenta a complexidade da previsão da tensão. Para superar este enigma foi realizada revisão bibliográfica, bem como feita uma conexão com os fatores considerados nos estudos de comportamento da carga.

Diante da importância de utilizar um número reduzido de variáveis de entrada, tanto para atender o princípio da simplicidade como apresentar previsões com resultados eficientes, embasadas no carregamento do sistema, se faz necessário a realização de um número significativo de simulações para avaliar a relevância das grandezas: tempo, temperatura, corrente, tensão, potência reativa e potência ativa. Através das simulações também são definidos os conjuntos de teste e validação, bem como executados processos de tratamento, normalização e padronização dos dados utilizados.

Em referência à bibliografia especializada, a qual relaciona o comportamento da tensão ao carregamento, a previsão é realizada por patamar de carga em função da hora do dia, ou seja, a amostra diária é dividida em madrugada, manhã, tarde e noite. Esta medida, além de atender os princípios da literatura técnica, contribui para redução do número de regras, tempo de processamento e transparência do resultado. Este procedimento está apresentado Figura 4.4.

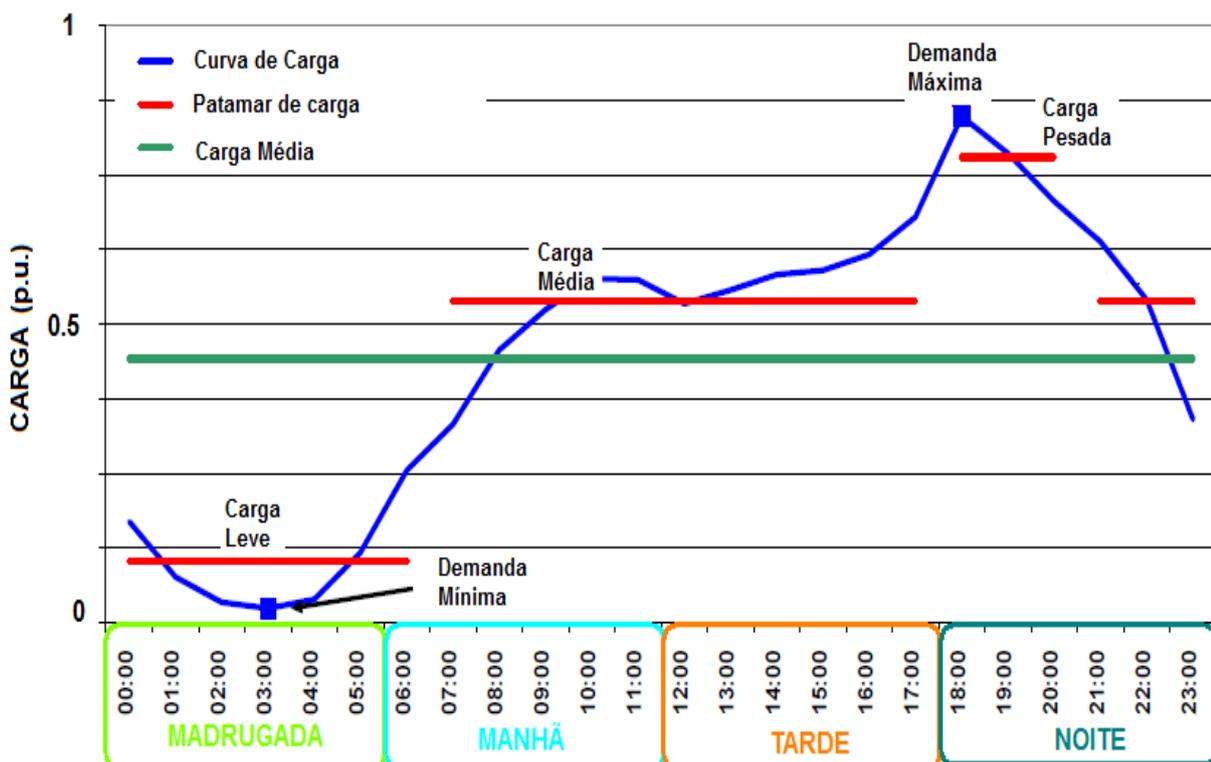


Figura 4.4 – Curva de carga típica por patamar

A partir da divisão por patamar, os dados referentes ao turno adotado para o treinamento equivalem à janela de dados. Na aplicação da metodologia sugere-se o treinamento diário para cada patamar, logo, a cada dia são incluídos os novos registros referentes ao patamar e descartados os dados referentes às 6 horas do dia mais antigo. A Figura 4.5 ilustra o movimento da janela de dados a cada novo conjunto de amostras disponibilizadas.

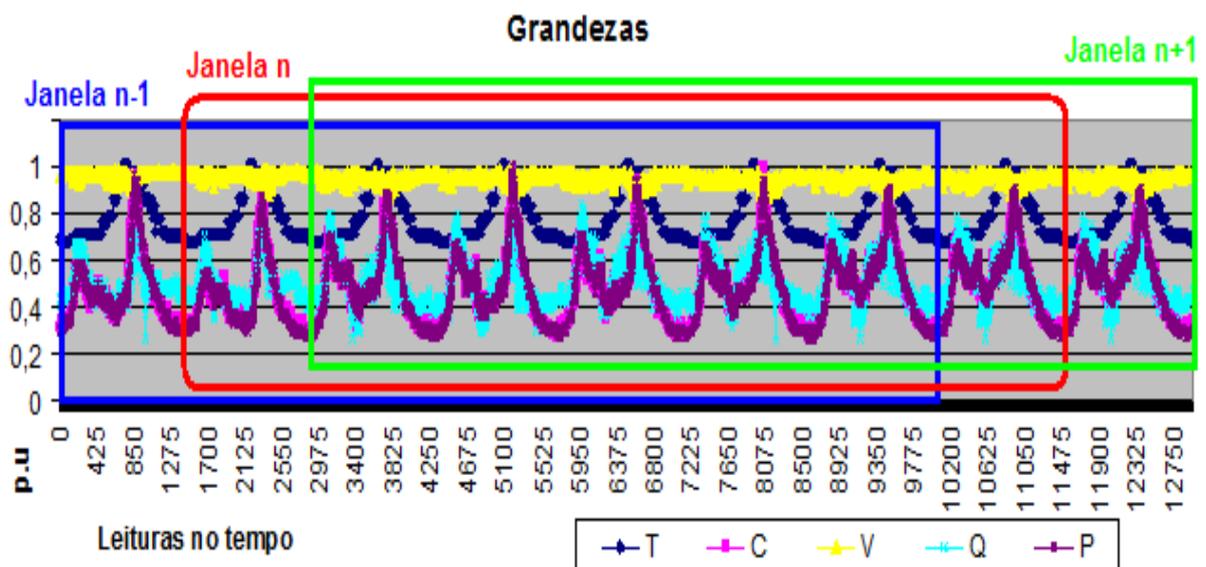


Figura 4.5 – Ilustração da janela de dados no tempo

Para realizar as simulações referentes à previsão foi desenvolvido um sistema adaptativo de inferência *Neurofuzzy*, através da função ANFIS, a qual é equipada com um algoritmo de treinamento, baseado na arquitetura do controlador tipo *Sugeno*. Portanto, a partir das variáveis de entrada e saída é realizado o processo de treinamento, o qual pondera regras *fuzzy* e funções de pertinência, para criar e ajustar o conjunto de regras que viabilizam a indicação da tensão prevista na saída do sistema.

Para o treinamento do ANFIS, nesta aplicação optou-se pela técnica “*Grid partition*”, cuja escolha está relacionada à adoção de conjuntos baseados em patamares de carga e a importância do sistema proposto contemplar variáveis de saída zero. Além disso, as outras técnicas de treinamento baseadas em “*clusters*” não apresentaram desempenho satisfatório para o volume de amostras semanal e criaram conjuntos incoerentes aos conceitos básicos de controle de tensão, isto é, não atendem os princípios relativos aos patamares de carga e dias da semana.

A Figura 4.6 apresenta o sistema ANFIS do tipo *Sugeno*, referente ao bloco 1B do Módulo 1 do diagrama da metodologia.

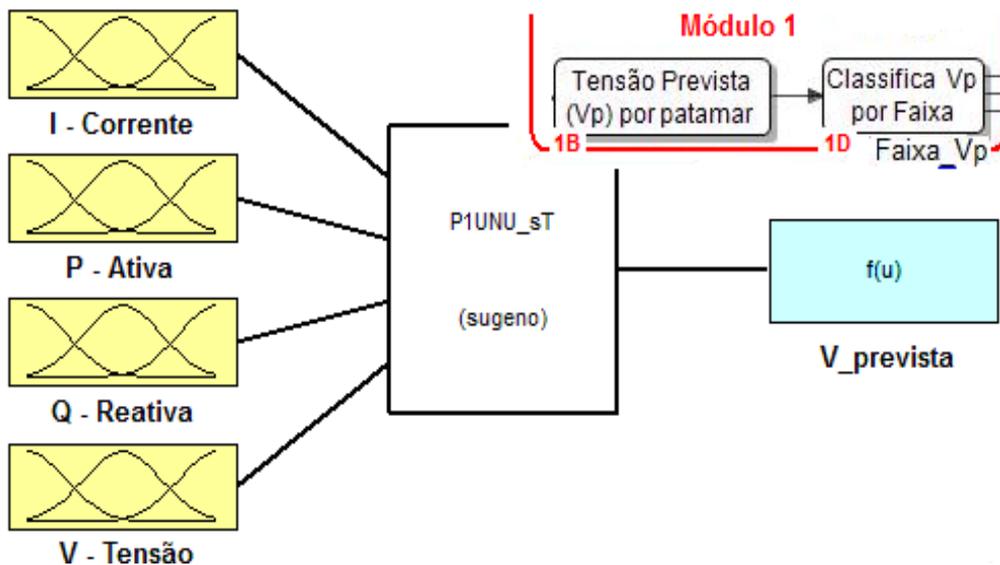


Figura 4.6 – Detalhe do bloco predictor de tensão por patamar

Quanto à escolha do método de otimização do treinamento se deve a sua maior eficiência de operação quando comparado com o “*backpropagation*”, já que o híbrido apresenta menor tempo de processamento. Os resultados obtidos a partir dos sistemas de previsões propostos são satisfatórios e estão apresentados no capítulo sexto através do desenvolvimento prático da metodologia. Além do desempenho satisfatório apresentado pelas Redes *Neurofuzzy* para previsão, esta técnica também é importante na integração dos blocos relativos à previsão com os sistemas de tomada de decisão baseados em Lógica *Fuzzy*.

Diante da necessidade de testar a metodologia através de simulações, utilizou-se o pacote do programa *Matlab*[®], no qual os algoritmos foram implementados no *Toolbox de Fuzzy System*. Os sistemas criados no ANFIS foram integrados ao *Simulink*, cujo ambiente de simulação apresenta desempenho adequado para a proposta deste trabalho. Maiores detalhes sobre sistemas nebulosos e conceitos intrínsecos podem ser consultados nos Apêndice A, Apêndice B e Apêndice C, onde estão referenciadas literaturas relativas à Lógica *Fuzzy* e o *Neurofuzzy*, bem como são apresentados os principais diagramas desenvolvidos e implementados.

4.2.3 Análise da transgressão da faixa de tensão

Através da análise da tensão de cada amostra é possível indicar ações para ajustar o nível de tensão. Os limites regulados pelo PRODIST para faixa de tensão adequada são utilizados de forma alternativa a parametrização das funções tensão de referência e insensibilidade.

Conforme apresentado no diagrama da metodologia, cujo detalhe é apresentado na Figura 4.7, à análise da conformidade dos níveis de tensão é realizada através do bloco 1C, referente ao sistema *fuzzy* “Faixa_Va” e do bloco 1D referente a “Faixa_Vp”.

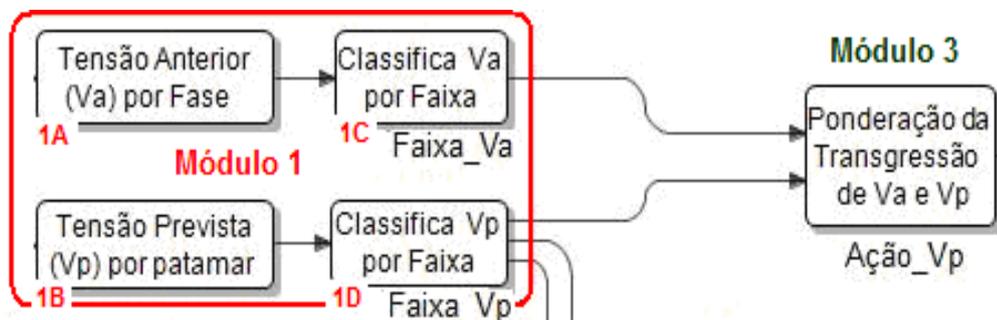


Figura 4.7 – Detalhe da metodologia referente a faixa de tensão

Os valores de tensão são convertidos para variáveis *fuzzy*, cujo processo de *fuzzificação* é realizado através de funções de pertinência. Através do *Toolbox de Fuzzy System*, o especialista transcreve os limites do PRODIST para o controle *fuzzy*. Este procedimento está ilustrado na Figura 4.8 e os conceitos relativos à Lógica *Fuzzy* estão apresentados no Apêndice A.

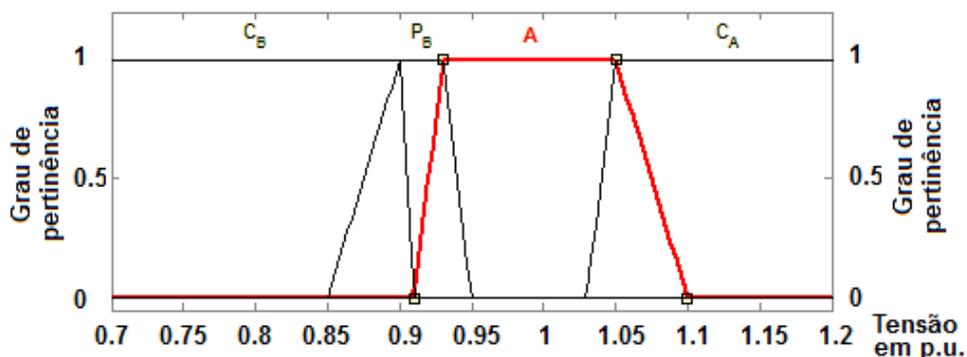


Figura 4.8 – *Fuzzificação* das faixas de tensão

Assim, os registros históricos e previstos, de cada amostra de tensão são avaliados através de sistema *fuzzy* do tipo *Mamdani*, isto é, são classificados nas categorias adequada, precária ou crítica. Para aplicar as funções de pertinência é necessário criar um banco de regras. Neste caso, as regras relativas às faixas de tensão reguladas pelo PRODIST para tensão entre 1 kV e 69 kV, estão apresentadas na Quadro 4.2.

SE ANTECEDENTE (VARIÁVEL NUMÉRICA)	ENTÃO CONSEQUENTE (VARIÁVEL LINGUÍSTICA / FUZZY)
Tensão Adequada	Faixa Adequada
Tensão Precária Baixa	Faixa Precária Baixa
Tensão Crítica Baixa	Faixa Crítica Baixa
Tensão Crítica Alta	Faixa Crítica Alta

Quadro 4.2 – Conjunto de regras *fuzzy* para faixa de tensão

A partir da ativação das regras são obtidos os números *fuzzy*. As variáveis linguísticas relacionadas à saída *fuzzy*, relativas às faixas de tensão, estão apresentadas na Figura 4.9.

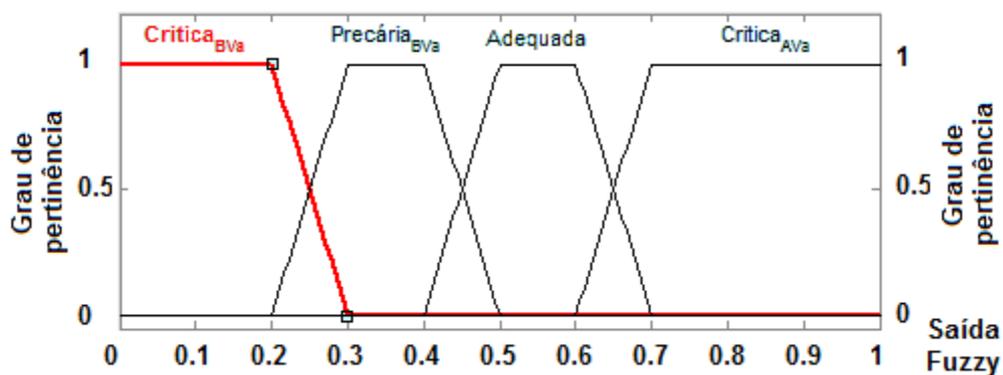


Figura 4.9 – Saída do controle *fuzzy* para faixas de tensão

O módulo 3 da metodologia utiliza como entrada no sistema *fuzzy*, as variáveis de saídas do módulo 1, isto é, as saídas *fuzzy* dos blocos 1C e 1D relativos a faixa de tensão. O sistema *fuzzy* “Ação_Vp”, implementado para o módulo 3, está apresentado na Figura 4.10. A partir da ponderação das faixas de tensão é processada a saída *fuzzy* referente a três ações relativas à tensão: aumentar, manter ou diminuir. Outros conjuntos de regras elaboradas para estes sistemas *fuzzy* estão apresentados no Apêndice C.

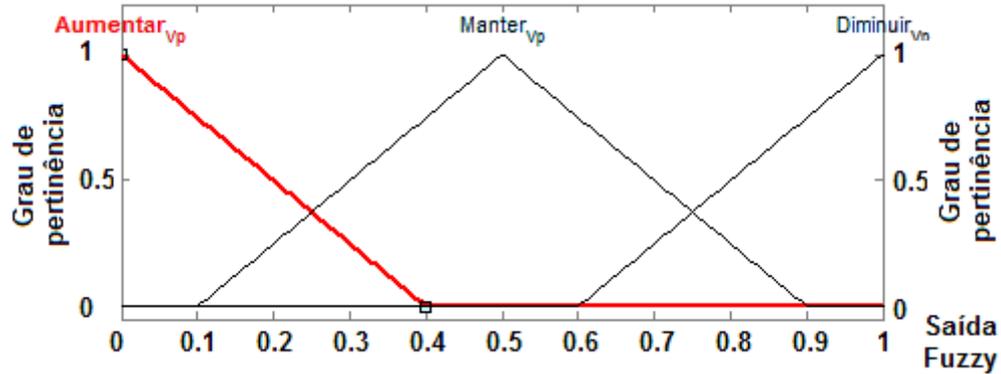


Figura 4.10 – Saída *fuzzy* referente a ponderação da transgressão de tensão

4.2.4 Indicadores utilizados na metodologia

Os indicadores regulados pelo PRODIST são para análise de eventos a “*posteriori*”. Diante da importância de ter parâmetros que contribua para tomada de ações proativas, isto é, antes que ocorra a violação dos indicadores regulamentados, são propostos dois novos indicadores para análise a “*priori*”. Assim, a metodologia apresentada utiliza índices equivalentes por fase, os quais consideram a violação dos indicadores a partir da faixa de tensão de cada amostra.

Em correlação aos indicadores regulamentados DRP e DRC e ao intervalo de integração definido pelo PRODIST, são verificadas as transgressões para um período de 10 minutos, que equivale a 10 amostras. A principal finalidade do uso destes indicadores é a ter função análoga à temporização, desta forma, as transgressões referentes a 10 amostras são ponderadas para evitar violação dos índices regulados.

A utilização dos indicadores, evita ações desnecessárias em função das variações rápidas de tensão, assim, a importância da alteração é indicada nos casos de reincidência da transgressão no intervalo de 10 minutos.

Os dois indicadores propostos são apurados através do somatório das últimas 9 amostras registradas e do valor previsto para o minuto seguinte. Conforme apresentado na Equação 6, o índice acumula o resultado das últimas 9 amostras históricas e a cada novo valor descarta o registro mais antigo e adiciona ao somatório o índice do último valor previsto. O resultado do somatório é dividido pelo número de leituras válidas da amostra.

$$DRP_{E10} = \left(\sum_{n=i}^{n=i+8} nlp_H + nlp_P \right) / NA_T \quad \text{e} \quad DRC_{E10} = \left(\sum_{n=i}^{n=i+8} nlc_H + nlc_P \right) / NA_T \quad (6)$$

Em que:

DRP_{E10} : índice de duração relativa da transgressão para tensão precária equivalente, no intervalo de 10 amostras.

DRC_{E10} : índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica equivalente.

nlp_H : número de leituras históricas situadas na faixa precária.

nlp_P : número de leituras previstas situadas na faixa precária.

nlc_H : número de leituras históricas situadas na faixa crítica.

nlc_P : número de leituras previstas situadas na faixa crítica.

NA_T : Número de amostras acumuladas no período.

Conforme apresentado no diagrama da metodologia, os blocos 3C e 3D, destacados na Figura 4.11, são dedicados aos índices DRP_{E10} e DRC_{E10} .

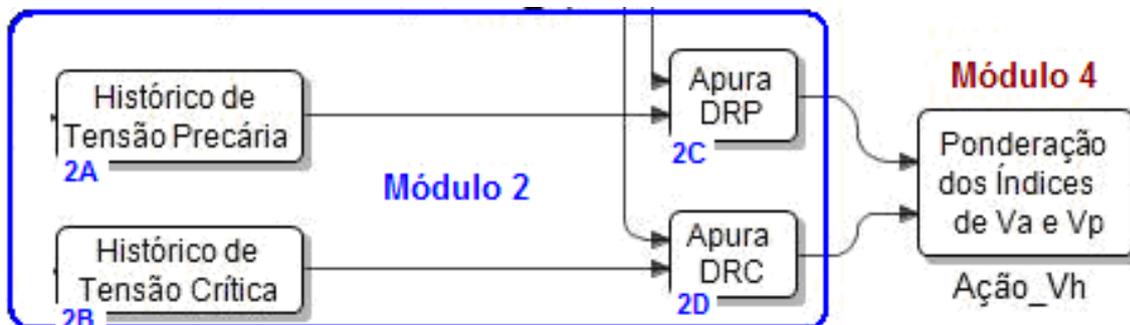


Figura 4.11 – Detalhe da metodologia referente aos índices utilizados

De forma semelhante à *fuzzificação* da tensão em faixas, neste caso, o especialista ajusta os limites e cria regras para os índices aplicáveis no curtíssimo prazo, os quais são propostos nesta dissertação.

Os limites para o DRP_{E10} são parametrizados em três níveis, conforme apresentado na Figura 4.12. Assim, pelo proposto na metodologia é tolerável ter até duas leituras na faixa precária.

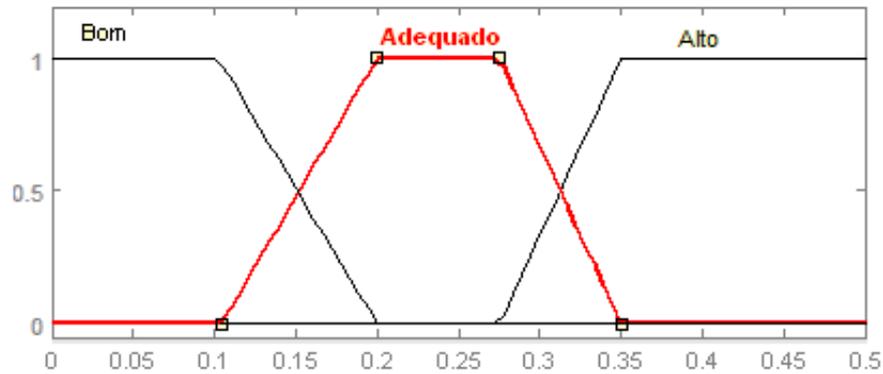


Figura 4.12 – *Fuzzificação* do índice proposto DRP_{E10}

Na implementação da metodologia, os indicadores propostos são multiplicados por constantes, a fim de garantir a *fuzzificação* dentro de um universo de discurso válido e manter a relação com os indicadores regulados.

De forma análoga ao DRP_{E10} , o processo de *fuzzificação* do DRC_{E10} está ilustrado na Figura 4.13. Observa-se que neste indicador tolera-se apenas uma leitura na faixa crítica.

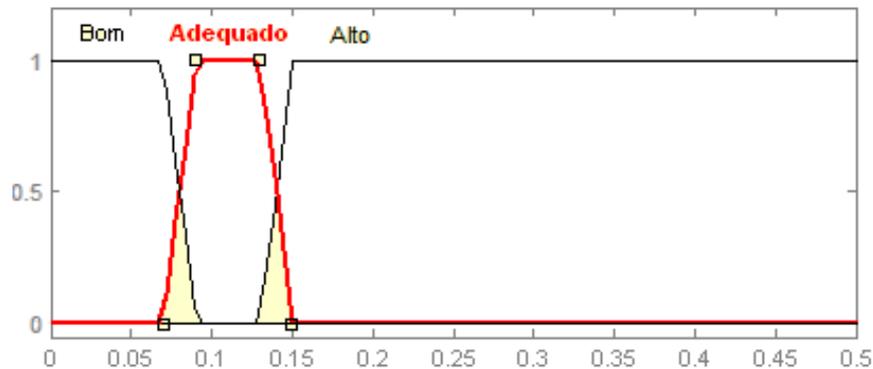


Figura 4.13 – *Fuzzificação* do índice proposto DRC_{E10}

As saídas *fuzzy* relativas aos indicadores propostos DRP_{E10} e DRC_{E10} são equivalentes. Desta forma, o resultado para ambos os indicadores é obtido no mesmo formato, conforme as funções de pertinência e os rótulos linguísticos apresentados na Figura 4.14.

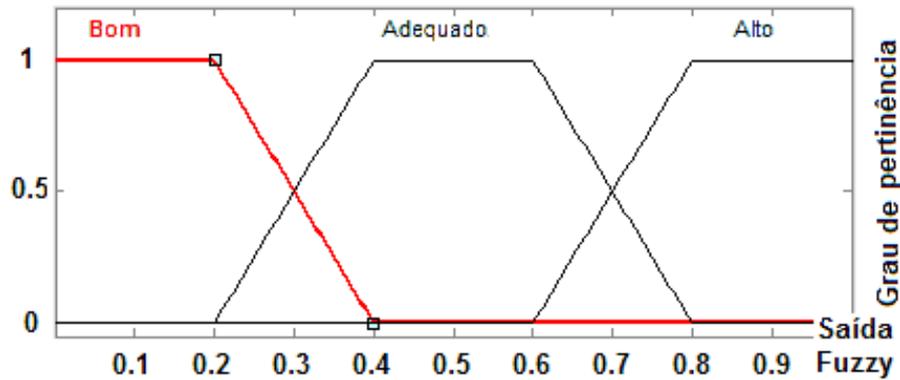


Figura 4.14 – Defuzzificação dos índices de qualidade DRP_{E10} e DRC_{E10}

De forma equivalente as regras elaboradas para fuzzificação da tensão em faixas, no Quadro 4.3 está apresentado o conjunto de regras elaboradas para conversão do indicador DRC_{E10} para forma de variáveis fuzzy. Para tanto, são adotados três níveis: alto, adequado e baixo. As regras deste indicador são análogas as elaboradas para o indicador DRC_{E10} .

SE ANTECEDENTE (VARIÁVEL NUMÉRICA)	ENTÃO CONSEQUENTE (VARIÁVEL LINGUÍSTICA / FUZZY)
nlc é Alto	DRC é Alto _{DRC}
nlc é Adequado	DRC é Adequado _{DRC}
nlc é Bom	DRC é Bom _{DRC}

Quadro 4.3 – Conjunto de regras *fuzzy* para indicador

O módulo 4 da metodologia utiliza como entrada do sistema *fuzzy* do tipo *Mandami*, as variáveis de saídas do módulo 2, isto é, as saídas *fuzzy* dos blocos 3C e 3D relativos a violação dos índices. O sistema *fuzzy* “Ação_Vh”, implementado para o módulo 4, está apresentado na Figura 4.15 e as regras estão no Apêndice C.

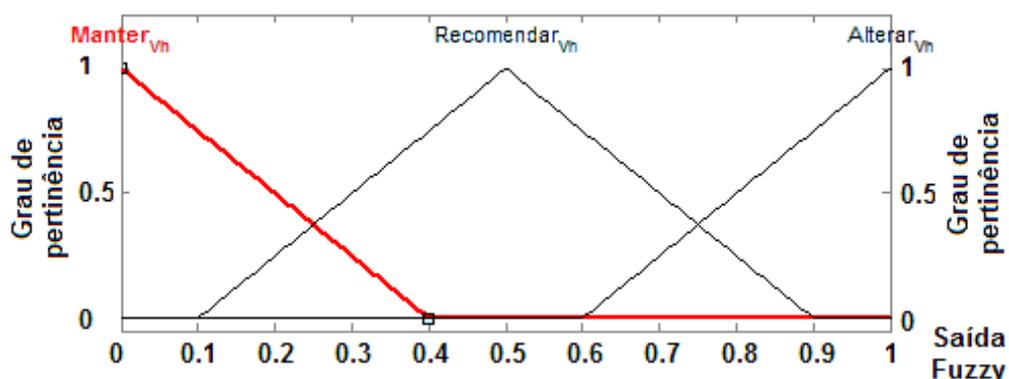


Figura 4.15 – Saída *fuzzy* referente a ponderação da violação de indicadores

4.2.5 Ação indicada pela metodologia

Implantados os blocos de *fuzzificação* das faixas de tensão e dos indicadores, a tomada de decisão ocorre através de uma cadeia em cascata de controles *fuzzy* do tipo *Mamdani*. O especialista pode interferir no resultado do modelo através do ajuste das funções de pertinência e da elaboração do conjunto de regras.

A Figura 4.16 destaca o módulo 5 da metodologia relativo à ponderação da transgressão da faixa de tensão versus violação dos indicadores utilizados. Os sistemas *fuzzy* implementados para os dois últimos módulos da metodologia apresentada são simples, já que as variáveis de entrada estão no formato de número *fuzzy*.



Figura 4.16 – Detalhe da metodologia referente à ação indicada

No módulo 5, que antecede o bloco de decisão final, são relacionados os parâmetros referentes aos indicadores de qualidade e as faixas de tensão. Os blocos “Ação Índice” e “Ação V” contemplam a relevância destes dois aspectos para a metodologia. Assim, o módulo 5 pondera as saídas *fuzzy* dos módulos 2 e 4, as quais estão apresentadas na Figura 4.17 e Figura 4.18. A saída *fuzzy* relativa ao sistema *fuzzy* “Ação Índice” está apresentada na Figura 4.17.

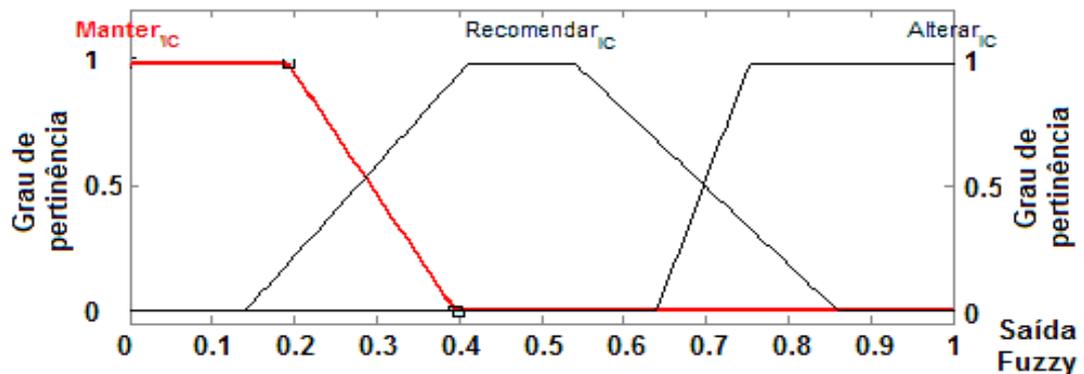


Figura 4.17 – Saída *fuzzy* referente à ponderação do índice

Quanto à saída relativa à “Ação V”, a Figura 4.18 traz as funções de pertinência e as variáveis linguísticas. O conjunto de regras referente ao módulo 5 é apresentado no Apêndice C.

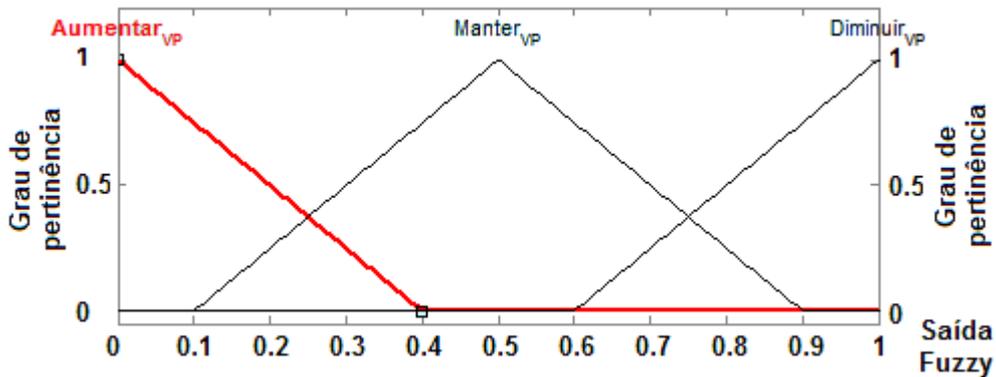


Figura 4.18 – Saída *fuzzy* referente à ponderação da tensão

O módulo 6 é dedicado à tomada de decisão relativa à ação final indicada pela metodologia. Portanto, nesta fase da cadeia de blocos da metodologia é ponderada a tendência de transgressão dos limites da faixa de tensão adequada no minuto seguinte e a probabilidade de violação dos índices de qualidade a partir da amostra prevista.

Desta forma, o módulo 6 contém os últimos parâmetros relativos à otimização do controle da tensão. Na Figura 4.19 está apresentada a saída corresponde à ação final indicada pela metodologia para a tensão da fase em análise.

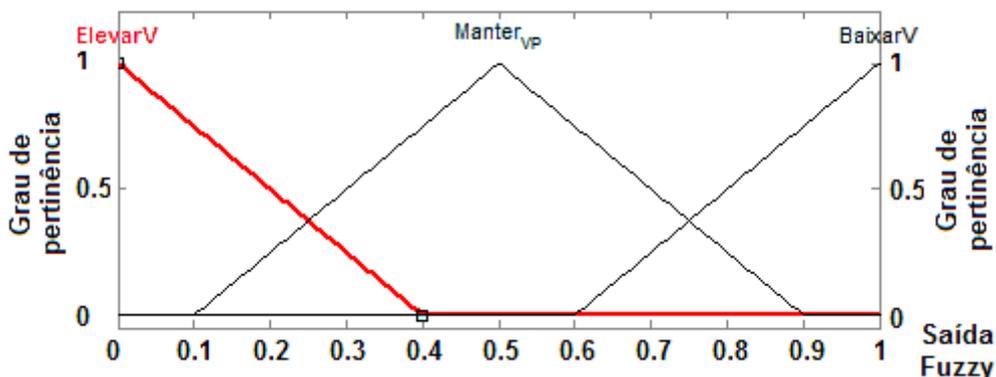


Figura 4.19 – Inferências utilizadas no controle “Ação Indicada”

Diante da importância do último bloco para o entendimento da metodologia, as inferências aplicadas na tomada de decisão final estão representadas através do conjunto de regras *fuzzy* detalhado no Quadro 4.4.

SE ANTECEDENTE “A” (SAÍDA AÇÃO_V)	E ANTECEDENTE “B” (SAÍDA AÇÃO_INDICE)	ENTÃO CONSEQUENTE (AÇÃO_FINAL INDICADA)
Aumentar	Manter	Manter
Aumentar	Recomendar	Elevar
Aumentar	Alterar	Elevar
Manter	Manter	Manter
Manter	Recomendar	Manter
Manter	Alterar	Manter
Diminuir	Manter	Manter
Diminuir	Recomendar	Baixar
Diminuir	Alterar	Baixar

Quadro 4.4 – Conjunto de regras *fuzzy* para ação indicada

Dado que o sistema elétrico é susceptível a interrupções de fornecimento e manobras de reconfiguração, conforme Kagan (2009), além da tensão prevista foi inserida uma funcionalidade que sinaliza o desvio da previsão. Desta forma, o equipamento de ajuste de tensão provido de controle inteligente pode valorar a informação recebida através de parametrização pré- definida para o erro.

Outra funcionalidade que integra a metodologia é a análise do desequilíbrio de tensão entre fases, conforme proposto por ANEEL (2010c), neste sentido é indicado o percentual identificado para que a ferramenta de apoio operacional ou o relé inteligente pondere este aspecto na tomada de decisão.

A metodologia apresentada contempla 4 sistemas dedicados a previsão de tensão por patamar, dos quais resulta um total de 592 regras *fuzzy* geradas através do ANFIS. Além disso, para tomada de decisão, são aplicados 11 sistemas *fuzzy*, que resulta em aproximadamente 74 regras *fuzzy* criadas por especialista.

A implementação da metodologia apresentada foi realizada em *Matlab*[®], utilizando o *Toolbox de Fuzzy System* e a validação foi através de simulações no *Simulink*. No Apêndice C está apresentado o diagrama de blocos do sistema utilizado para simulação e validação da metodologia, bem como regras *fuzzy* elaboradas.

Na Figura 4.20 estão ilustradas as principais grandezas de saída, a tensão prevista para o minuto seguinte, a ação indicada pela metodologia e o erro relativo, o qual é apurado em função da tensão prevista e da tensão real da última amostra.

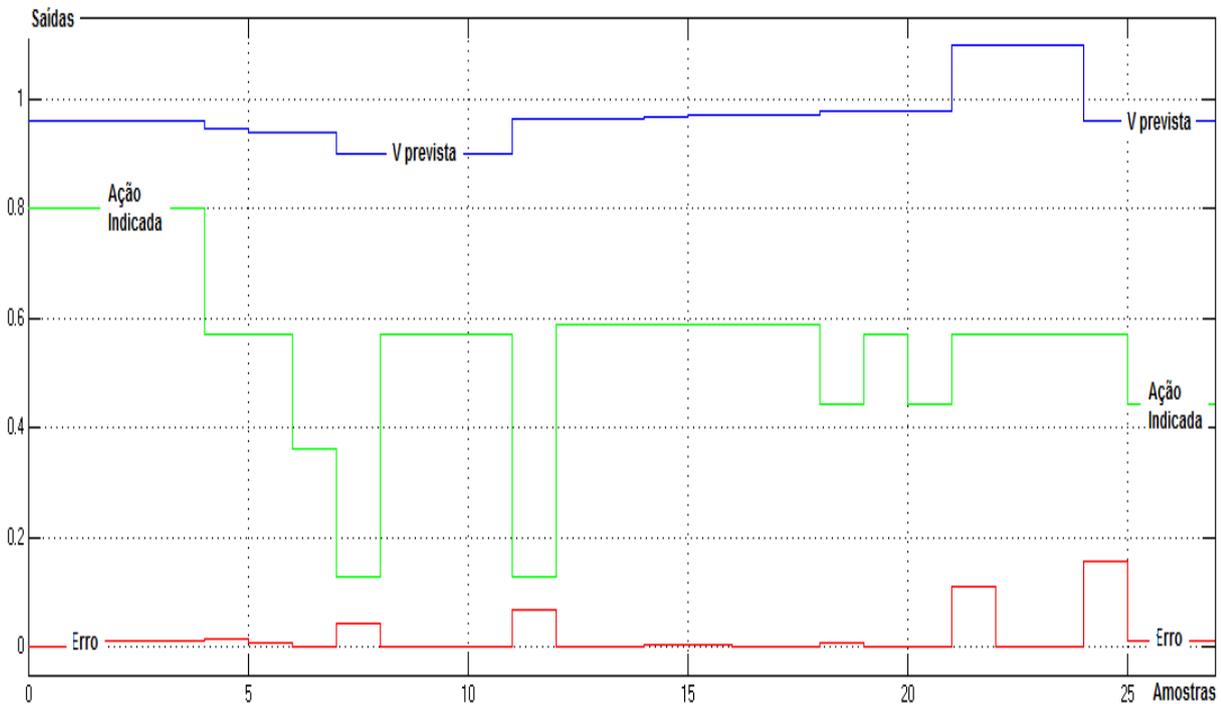


Figura 4.20 – Saídas *fuzzy* obtidas para o conjunto de checagem

4.3 Considerações finais do capítulo

Este capítulo buscou detalhar as funcionalidades dos blocos que integram a metodologia proposta, explanando a abrangência do método. A metodologia em si está apresentada no fluxograma e elucidada nos itens referentes aos módulos de previsão da tensão e tomada de decisão. Os índices propostos ponderam a tendência de transgressão da tensão adequada e o reflexo na violação dos indicadores regularizados.

Conforme objetivos apresentados no primeiro capítulo, com base no monitoramento do sistema de distribuição, a metodologia apresentada neste quarto capítulo indica ações para o controle de tensão. Como diferencial de trabalhos correlatos, na tomada de decisão esta dissertação pondera dados históricos e tensão prevista, desta forma, possibilita indicar proativamente a ação a ser tomada para otimizar a operação dos equipamentos de ajuste da tensão.

No próximo capítulo serão apresentados o desenvolvimento prático e os resultados obtidos para um alimentador do sistema de distribuição. Neste sentido são realizadas simulações, a fim de validar as configurações dos parâmetros propostos.

5 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta as simulações do cenário desenvolvido a partir de um sistema de distribuição real para validar a aplicação prática da metodologia proposta. O alimentador escolhido é predominantemente rural com presença significativa de carga destinada à irrigação. A opção por este circuito está relacionada às características identificadas, já que possui aproximadamente 927 km de extensão de rede primária, 6 bancos de reguladores de tensão, 4 religadores, 7 banco de capacitores e 1107 transformadores de distribuição. O sistema está apresentado na Figura 5.1.

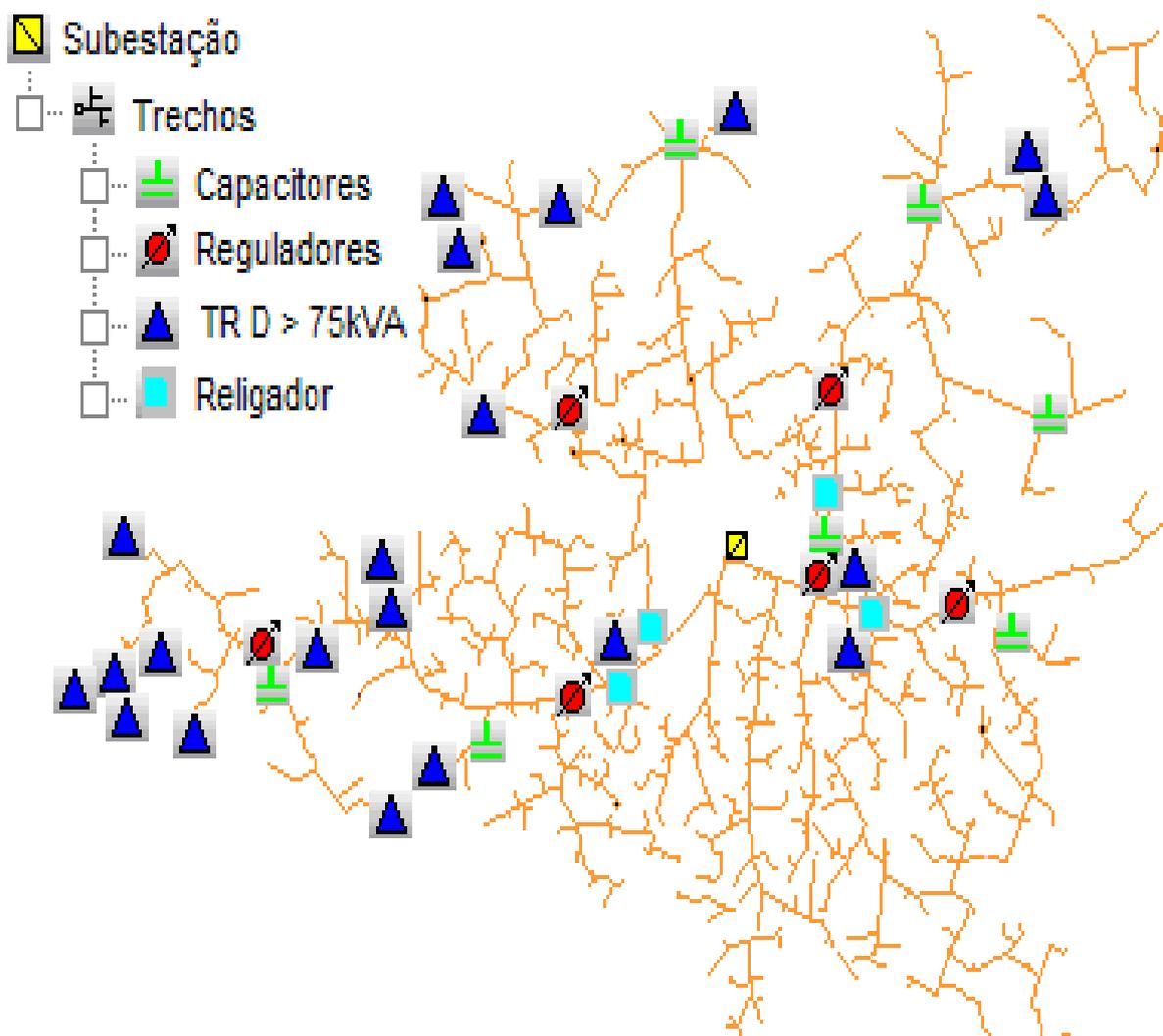


Figura 5.1 – Diagrama unifilar do alimentador teste

Conforme apresentado na Figura 5.2, a curva de carga utilizada nas simulações foi obtida a partir do arquivo de memória de massa do medidor instalado no ponto de conexão da distribuidora a uma tomada de energia do alimentador escolhido para simulação, cujo período de medição utilizado se refere ao mês de novembro de 2011.

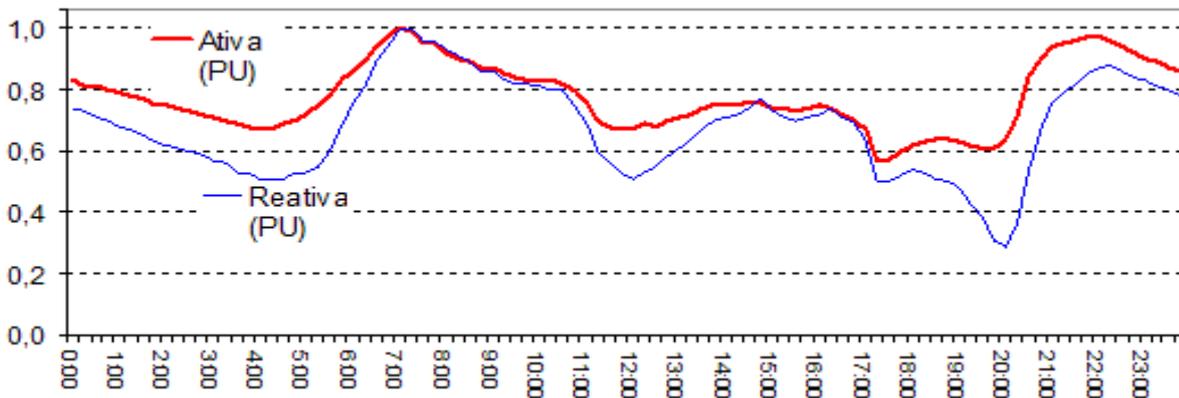


Figura 5.2 – Curva de carga típica do alimentador teste

5.2 Cenário para aplicação da metodologia

A metodologia apresentada é aplicável em sistemas de distribuição com elevado grau de automação. Como esta condição ainda não é realidade nas distribuidoras, propõe-se utilizar os recursos atualmente disponíveis para elaborar o cenário que possibilite a aplicação da metodologia. Para tanto, são utilizados os registros realizados nas subestações, religadores e clientes do grupo A do alimentador escolhido.

Na metodologia apresentada, estes recursos são explorados na identificação de tendências de futuras transgressões dos níveis de tensão e violações dos indicadores de qualidade. Neste contexto, a metodologia apresentada indica ações nos equipamentos de ajuste para atender os índices relativos à tensão ao longo do alimentador.

Para explorar as informações relevantes para a análise instantânea dos níveis de tensão, a tomada de decisões considera também os registros históricos das grandezas elétricas e meteorológicas. Portanto, para extrair o conhecimento de séries temporais devem ser analisadas as características básicas das variáveis, já

que os resultados estão atrelados à correção de erros grosseiros e valores incompletos. (CAMPOS, 2008).

Os registros inválidos ocorrem devido eventos no sistema de distribuição, tais como desligamentos programados ou intervenções de emergência, ou ainda, por falha de registros como a indisponibilidade do canal de comunicação, neste sentido, Nascimento (2012), destaca alternativas para o tratamento. No presente trabalho os dados atípicos foram excluídos ou substituídos por valores das curvas típicas relativas às grandezas da amostra, a fim de definir um intervalo de dados válidos.

Diferentemente do nível de automação atual, no cenário das redes inteligentes inúmeros pontos serão monitorados. Diante do imenso volume de informações é necessário aplicar recursos avançados como a mineração de dados e métodos estatísticos com o propósito de apresentar novos subsídios atualmente impossibilitados de serem identificados.

É importante registrar que durante o levantamento de dados para o presente trabalho se identificou que as distribuidoras priorizam a automação de equipamentos de seccionamento, embora o telecomando de reguladores de tensão e outros dispositivos para monitoramento do sistema sejam fundamentais no cenário das redes inteligentes.

Também é importante destacar problemas identificados como a falta de parametrização dos dispositivos com capacidade de armazenamento em memória de massa, a imprecisão nos registros de tensão, a ausência de dados climáticos locais, a inconsistência nos registros, a dificuldade de extrair a informação no formato de relatórios e a indisponibilidade de registro de grandezas mesmo em pontos telecomandados.

5.3 Escolha do ponto para aplicação da metodologia

Dentro do trecho de rede escolhido para o estudo, foram identificados três pontos de monitoramento que possuíam registros disponíveis, sendo dois religadores e um cliente do Grupo A.

Para viabilizar as simulações da queda de tensão a partir do barramento da subestação foi utilizado um programa de utilização comercial para cálculo e análise de fluxo de potência, o PSL®DMS. Os resultados dos relatórios foram confrontados com a inspeção visual referente à localização dos equipamentos no diagrama unifilar

do circuito alimentador. Neste caso, optou-se pelo ponto de monitoramento referente ao religador que apresenta maior queda de tensão que os demais pontos. A localização do ponto escolhido e o resultado do relatório estão ilustrados na Figura 5.3.

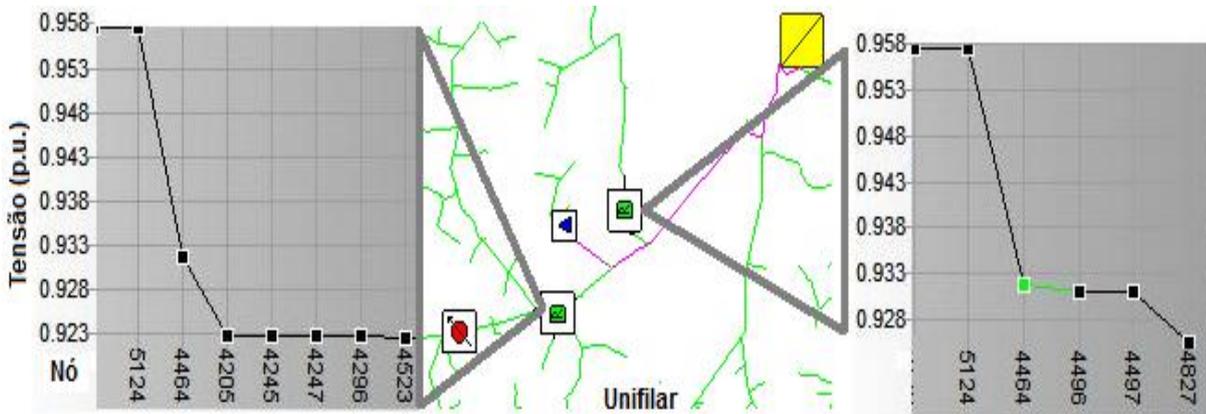


Figura 5.3 – Escolha do ponto de monitoramento

Para validação da metodologia proposta foram tomados como base os dados reais coletados a partir do sistema supervisório. O equipamento referenciado possui telemetria através do sistema SCADA e as grandezas elétricas são registradas por fase em intervalos de um minuto. Já os dados de temperatura são obtidos a partir dos registros históricos de uma estação meteorológica localizada na mesma região geográfica da distribuidora.

5.4 Validação da metodologia

Para a simulação referente à validação foi utilizado um conjunto de dados de 10080 leituras. Na parametrização do sistema ANFIS foram adotadas três épocas antes da conclusão da etapa de treinamento, cuja escolha está relacionada à evolução do erro de previsão em relação ao número de épocas. Os erros são estimados pela soma dos quadrados das diferenças entre o valor previsto e o observado, equivalente ao RMSE (Erro Quadrático Médio Normalizado).

Então, na etapa de treinamento de previsão, se obteve um conjunto de 243 regras, criadas e ajustadas pelo ANFIS, apresentou um erro médio de 0.00539. Já para o teste foram utilizados os registros referentes há um dia, cujo conjunto contém 1440 leituras, neste caso, resultou em um erro de 0.005041.

O resultado obtido inicialmente foi satisfatório, frente aos limites das faixas reguladas no PRODIST, porém foram realizadas outras simulações no sentido de embasar a previsão nos princípios da literatura técnica especializada em sistemas de distribuição. O resultado obtido para estes parâmetros são apresentados na Figura 5.4.

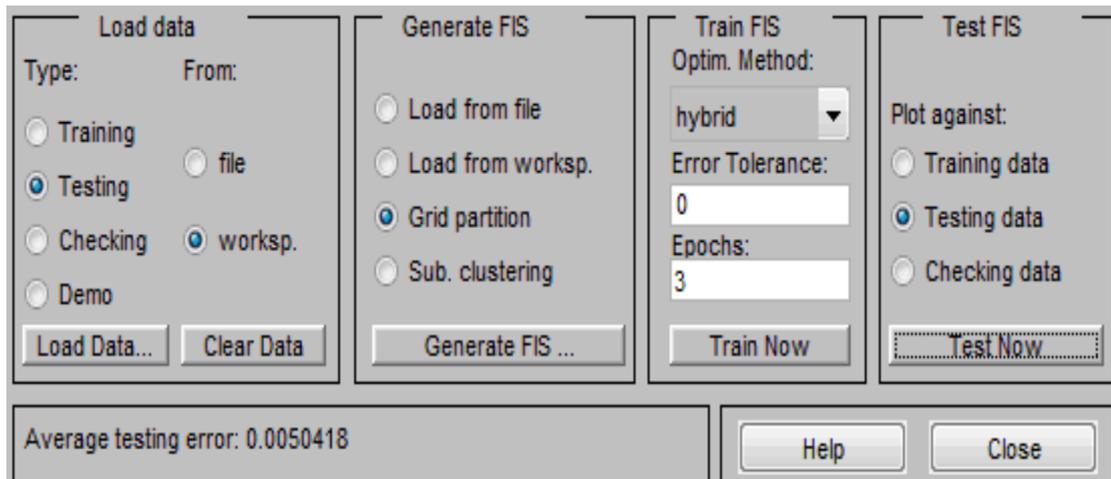


Figura 5.4 – Configuração e resultado do conjunto de validação.

Além da análise do erro, o resultado do ANFIS pode ser avaliado através de recurso gráfico, conforme ilustrado Figura 5.5.

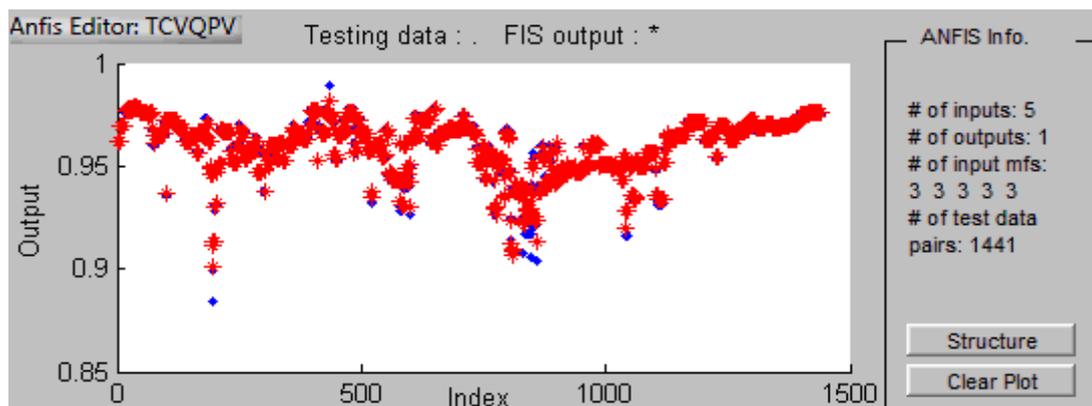


Figura 5.5 – Resultado gráfico do conjunto de validação.

Nas simulações foram alterados os conjuntos de validação para contemplar os conceitos de patamares de carga e dias da semana. A partir da alteração do conjunto de treinamento, busca-se redução do erro máximo, menos regras e rapidez no processamento.

Diante do resultado obtido na etapa de previsão os esforços foram concentrados na validação dos índices escolhidos e dos parâmetros que integram a cadeia de blocos para tomada de decisão. Para tanto, foram avaliados os resultados de cada bloco e, quando necessário, foram revisadas as regras e ajustadas as inferências a fim de obter na saída o efeito cabível.

Através do processo de *defuzzificação* obtêm-se as ações indicadas para o ajuste da tensão na forma de número *fuzzy* e variáveis linguísticas: Elevar V, Manter V e Baixar V. Em complemento à análise da ponderação do grau de pertinência referente ao bloco “Ação Final”, a Figura 5.6 apresenta detalhe do comportamento das variáveis *fuzzy* de saída.

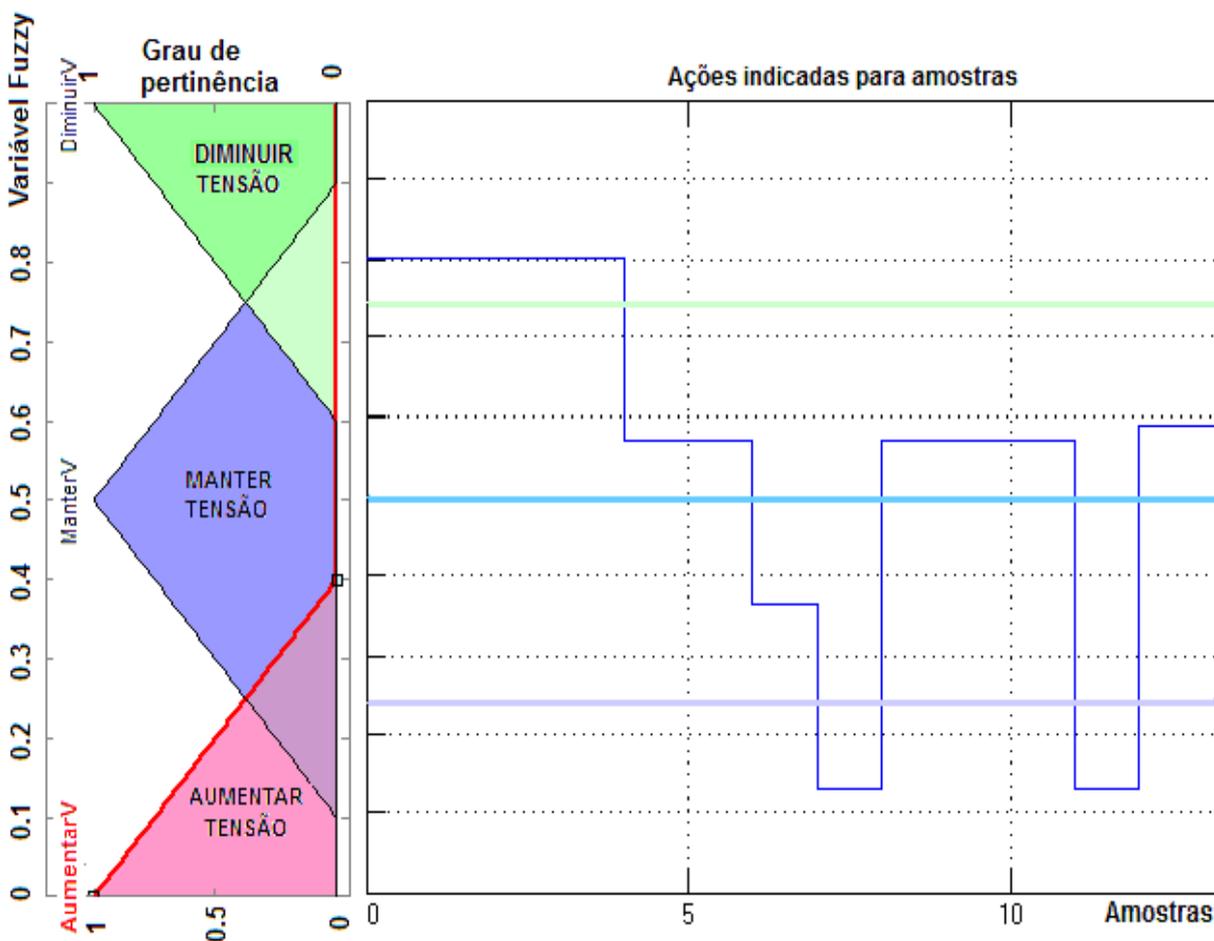


Figura 5.6 – Detalhe da ação final indicada pela metodologia

Para possibilitar a interpretação dos resultados para cada leitura através de inspeção visual foram extraídas 25 amostras, as quais compõem um conjunto de checagem. Os dados que compõem o conjunto de checagem foram extraídos dos

conjuntos de treinamento e ordenados de forma que contemple diversas combinações de variáveis de entrada.

Para validar as ações indicadas pela metodologia foram realizadas simulações através de conjuntos de checagem. Na Figura 5.7 está apresentado o conjunto de checagem utilizado com as respectivas grandezas de entrada: hora, corrente, potência ativa, potência reativa, tensão, leituras acumuladas na faixa crítica e leituras acumuladas na faixa precária.

Observa-se que além das grandezas consideradas na previsão de tensão, para tomada de decisão também são utilizados parâmetros relativos às amostras na faixa precária e crítica, os quais compõem a apuração dos índices DRP_{E10} e DRC_{E10} . Para análise do indicador, para a amostra 7 do conjunto de checagem, o valor da leitura precária vale 3 e da leitura crítica vale 2.

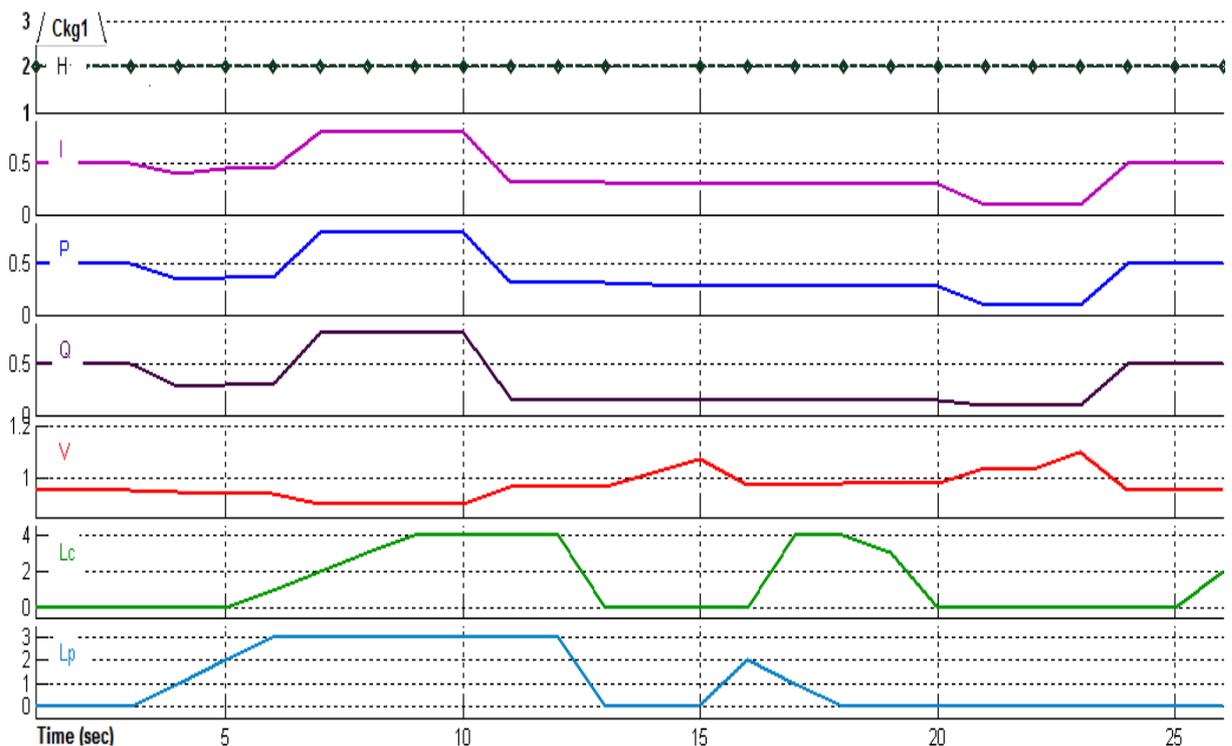


Figura 5.7 – Grandezas de entrada do conjunto de checagem

Na Figura 5.8 está ilustrado o resultado da ponderação entre os blocos relativos à violação dos indicadores adotados e a transgressão da faixa adequada de tensão. Deste modo, a ação indicada pela metodologia relaciona estes dois aspectos, conforme pode ser observado nas transições do sinal relativo às intervenções indicadas pela metodologia para o controle de tensão.

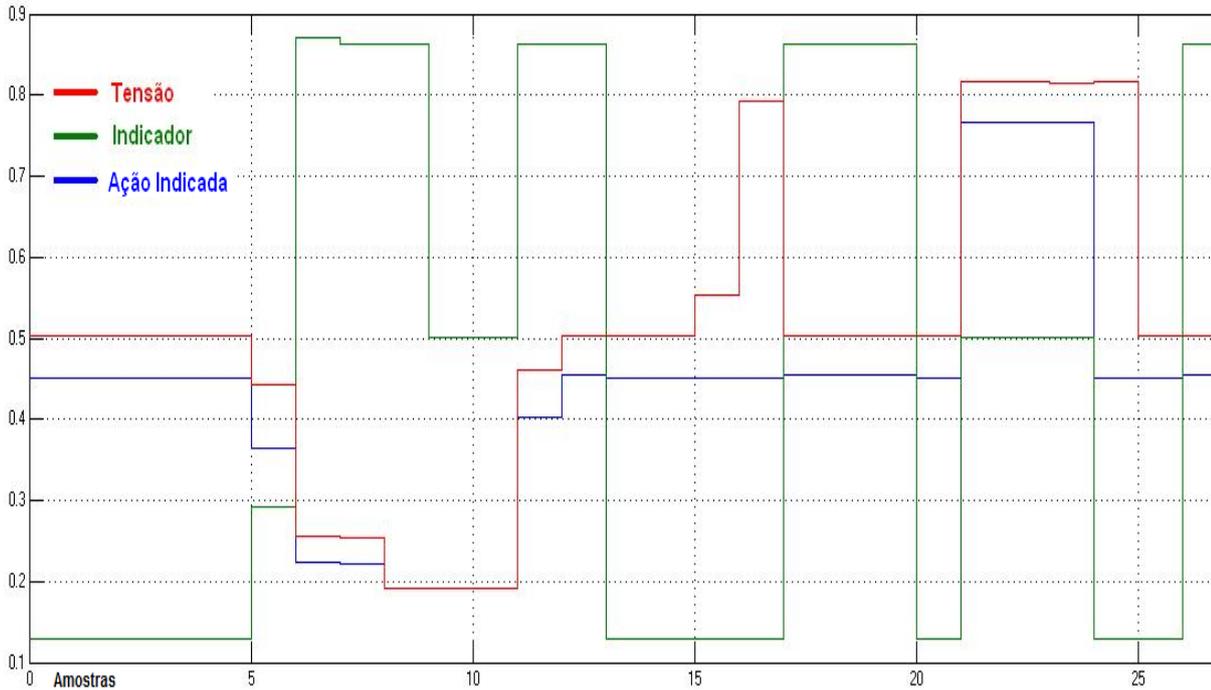


Figura 5.8 – Tomada de decisão para conjunto de checagem

Na análise da ação indicada pela metodologia para a amostra 7, observa-se que saída *fuzzy* referente ao indicador vale 0.88, cuja variável linguística equivale a “Alterar”, já a saída *fuzzy* relativa a tensão é aproximadamente 0.25, que equivale a variável linguística “Aumentar V”. Dadas estas condições de entrada, a ação indicada corresponde a 0.27, que equivale a “Elevar V”.

Na amostra 16 a saída referente à tensão corresponde a ação “Diminuir V”, por outro lado a ação indicada pelo indicador é referente a “Manter V”, através de ponderação a ação final indicada pela metodologia para a amostra 16 é “Manter V”. Ocorrência semelhante se observa na amostra 24, em que a ação indicada também é diretamente influenciada pelo indicador.

O resultado de simulação realizada no respectivo conjunto de checagem foi utilizado para ilustrar o efeito da retirada do indicador da metodologia, neste caso, a ação indicada pela metodologia corresponde a indicação da tensão. Desta forma, na Figura 5.9, observa-se que a ação indicada para a amostra 16 não tolera uma variação rápida de tensão.

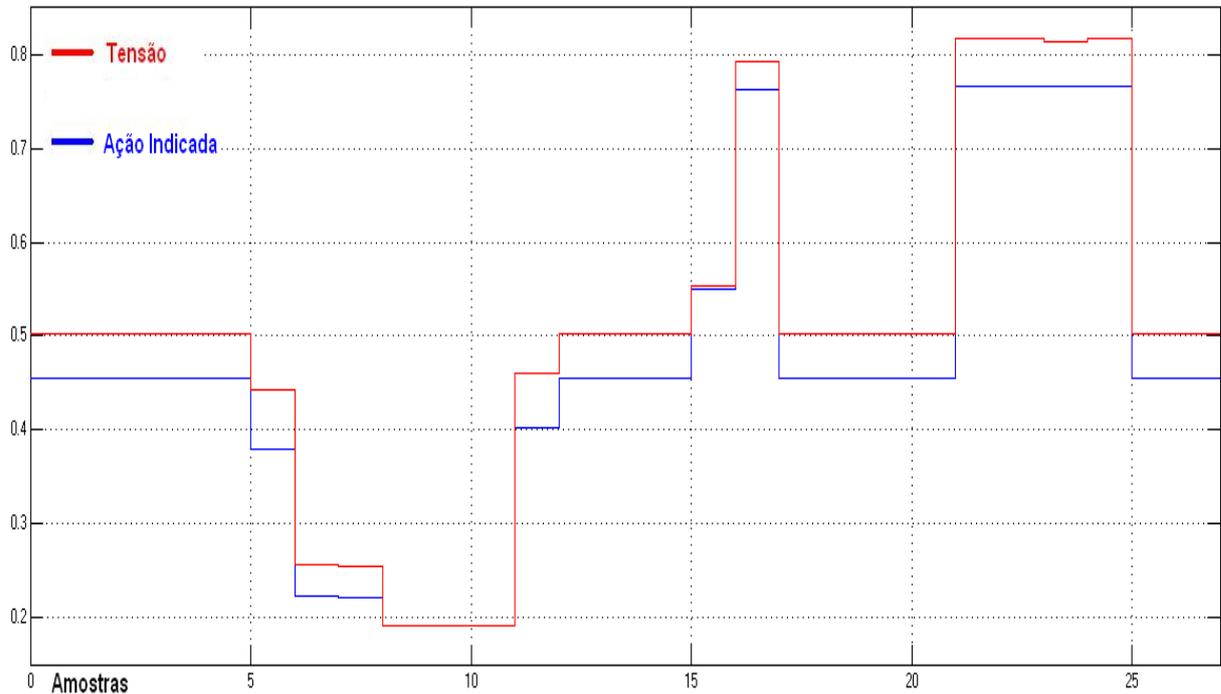


Figura 5.9 – Tomada de decisão sem indicador

De forma diferente da etapa de previsão, na qual o conjunto de regras é alterado a cada novo treinamento, na tomada de decisão os parâmetros configurados são válidos para diferentes aplicações. Cabe salientar que o especialista pode ajustar as inferências para variar os limites parametrizados para variáveis de entrada e saída, isto é, conforme a aplicação pode alterar as inferências e editar as regras *fuzzy*.

A alteração dos parâmetros utilizados, tal como o uso de faixas de tensão diferentes das definidas pelo órgão regulador, é uma alternativa para variar o resultado da metodologia quanto à insensibilidade e temporização.

O detalhamento da metodologia é evidenciado neste trabalho para possibilitar o entendimento dos especialistas e permitir a reprodutibilidade. Porém, cabe salientar que o propósito da metodologia apresentada é disponibilizar informações úteis para ferramentas de apoio operacional e relés inteligentes, ambos com tecnologia capaz de interpretar os graus de pertinência das variáveis de saída *fuzzy*.

A partir dos resultados verificados durante a validação da metodologia, conclui-se que o comportamento da metodologia é coerente para as diferentes combinações propostas. Assim, as simulações da metodologia são ampliadas para as aplicações práticas relativas aos patamares.

5.5 Aplicação prática da metodologia para previsão de tensão

Nas simulações realizadas foram testadas as retiradas de variáveis e combinações de diferentes períodos, observando o volume de dados de entrada, tempo de processamento e número de regras. A eficiência da modelagem pelo sistema *Neurofuzzy* está atrelada a utilização de um conjunto de treinamento suficientemente representativo, pois a interpolação adequada dos valores importantes para operação do sistema depende da distribuição dos valores no conjunto de treinamento. Portanto, o ANFIS reúne os dados de treinamento entrada-saída em *clusters*, com objetivo de identificar agrupamentos que representem o comportamento do sistema de forma concisa.

A seguir está apresentada a síntese das combinações testadas, cujos resultados estão relacionados ao resumo dos erros relativos obtidos na etapa de previsão do ANFIS. A utilização de conjuntos de treinamento referentes a sete dias implicou em instabilidade da previsão durante a aplicação do conjunto de treinamento, conforme dados obtidos para as combinações de quatro patamares aplicados aos dias úteis e não úteis.

Na Tabela 1 é apresentado o resultado obtido para o conjunto Patamar 3 composto pelas grandezas de entrada: Corrente, Potência Ativa, Potência Reativa, Tensão e Temperatura.

Tabela 1 – Resultado do conjunto do Patamar 3 para 7 dias úteis

Conjunto	Amostras	Erro
Treino	2520	0,00285
Teste	1440	0,011224

Em outra simulação complementar foi aumentado o número de amostras para os conjuntos de treinamento e teste. Desta forma, obteve-se estabilidade nos resultados e desempenho superior do sistema de previsão em relação à formação dos conjuntos de teste apurados anteriormente. Para representar esta condição, novamente é utilizado o conjunto referente ao Patamar 3, cujos resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultado do conjunto do Patamar 3 para 14 dias úteis

Conjunto	Amostras	Erro
Treino	5040	0,00259
Teste	2880	0,00322

A partir do aumento de amostras por conjunto foi testada a integração dos conjuntos referentes aos dias úteis e não úteis, totalizando 5040 amostras para treinamento e 2880 amostras para o conjunto de teste. Nesta configuração, o sistema obtido a partir do conjunto, entrada e saída, resultou em 243 regras. Os resultados da previsão de tensão, obtidos para os 4 patamares, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado dos conjuntos com dados integrados

Erro por Conjunto	Patamar 1	Patamar 2	Patamar 3	Patamar 4
Treino	0,00214	0,00306	0,00259	0,00337
Teste	0,01417	0,00359	0,00322	0,00649

Para garantir que toda a faixa de valores possíveis esteja contemplada no treinamento foi editada a amostra, ou seja, são inseridos valores de grandezas referentes aos extremos de tensão baixa e tensão alta. A Tabela 4 traz os valores normalizados.

Tabela 4 – Valores extremos inseridos nos conjuntos

I	P	Q	Vin	T	Vout
0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9
0,1	0,1	0,1	1,1	0,1	1,1

Diante da dificuldade operacional de obter informações meteorológicas em tempo real e considerando os resultados obtidos nos testes realizados, a composição final adotada para os conjuntos utilizados na etapa de previsão são desconsiderados os valores relativos à temperatura. Embora esta medida tenha melhorado o desempenho da previsão neste trabalho, para outro cenário não se descarta a correlação entre o comportamento da temperatura e tensão, pois os dados de temperatura utilizados nas simulações eram horários e não foram medidos no mesmo local do equipamento.

Então, neste trabalho, adotam-se como variáveis de entrada as grandezas: Corrente, Potência Ativa, Potência Reativa e Tensão Editada. Após a redução de uma variável de entrada o número de regras obtido por conjunto foi reduzido de 243 para 148. Os resultados obtidos para a configuração mais adequada são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado relativo aos conjuntos de treino e teste

Erro por Conjunto	Patamar 1	Patamar 2	Patamar 3	Patamar 4
Treino	0,00215	0,00315	0,00261	0,00331
Teste	0,00235	0,00287	0,00291	0,00293

Na Figura 5.10 está ilustrada a composição do conjunto de entrada identificado através de simulações como o mais adequado para aplicação da metodologia. Neste caso, utilizou-se o conjunto de 2880 amostras referente ao Patamar 2, o qual abrange o período de 6 horas relativo ao turno da manhã.

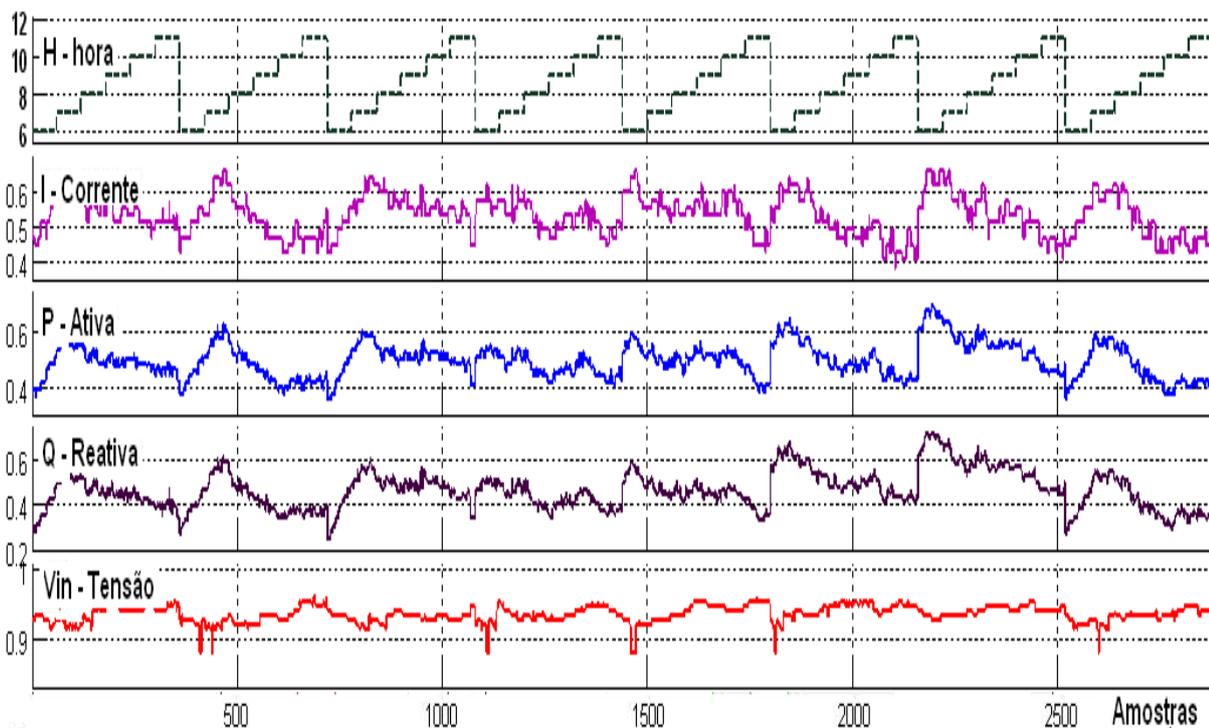


Figura 5.10 – Variáveis de entrada do conjunto de teste do Patamar 2

Na Figura 5.11 está apresentada a tensão prevista para o minuto seguinte, cujo comportamento pode ser confrontado com a tensão de entrada apresentada na Figura 5.10.

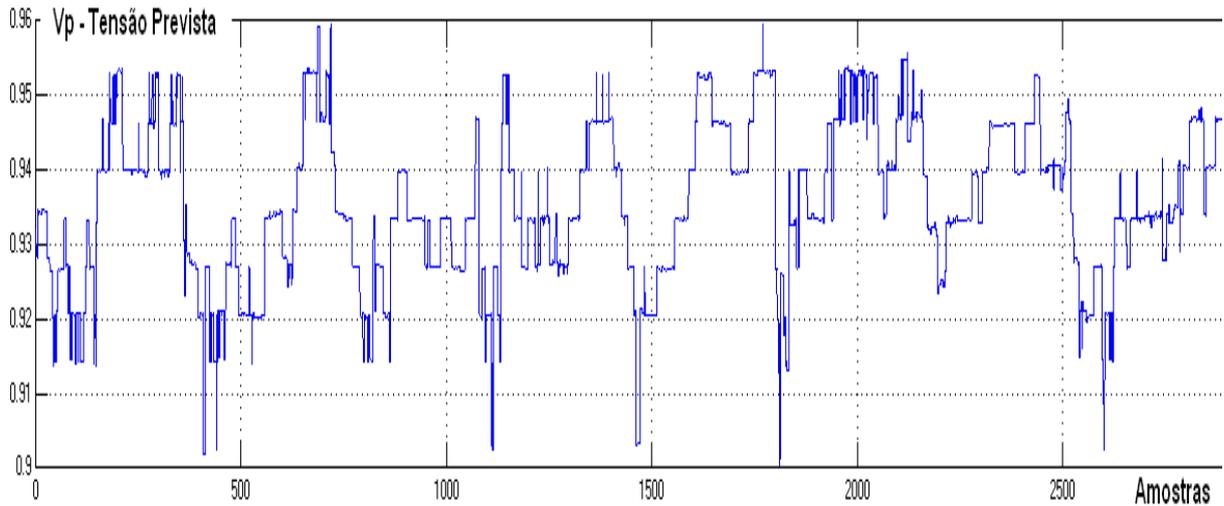


Figura 5.11 – Tensão prevista do conjunto de teste do Patamar 2

Em complemento ao RMSE (Erro Quadrático Médio Normalizado) apresentado pelo ANFIS, a qualidade da predição obtida foi verificada através de outros índices de desempenho utilizados em problemas de previsão de séries temporais: MAE (Erro Médio Absoluto), MSE (Erro Quadrático Médio) e MPE (Erro Percentual Médio). Maiores detalhes sobre índices de avaliação de predição podem ser consultados nas referências Devore (2011) e Campos (2008). Na Figura 5.12 está ilustrado o erro relativo indicado pela metodologia através de implementação no *Simulink*, cujo resultado compara o valor previsto e o real de cada amostra.

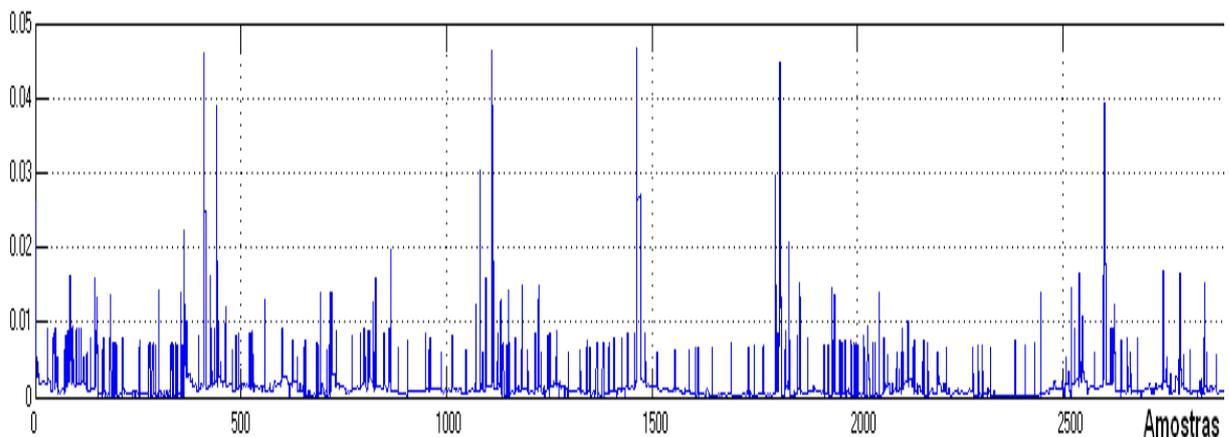


Figura 5.12 – Erro relativo ao conjunto de teste do Patamar 2

A Tabela 6 traz os valores dos erros calculados em planilhas para os conjuntos por patamar, os quais foram apurados a partir dos dados reais e dos valores extraídos das simulações realizadas no *Simulink*.

Tabela 6 – Resultado complementar dos conjuntos de teste

Erro por Conjunto	Patamar 1	Patamar 2	Patamar 3	Patamar 4
MAE	$1,2 \times 10^{-03}$	$1,4 \times 10^{-03}$	$1,3 \times 10^{-03}$	$1,6 \times 10^{-03}$
MSE	$7,5 \times 10^{-06}$	$8,9 \times 10^{-06}$	$9,1 \times 10^{-06}$	$9,6 \times 10^{-06}$
MPE	-3,78%	2,12%	0,35%	2,16%

A partir das simulações realizadas, identificou-se a forma mais adequada de utilização dos dados históricos para previsão de tensão. Portanto, a combinação adotada para o período de previsão deve contemplar a integração dos dados por patamares de dias úteis e não úteis. O conjunto de dados para treinamento de cada patamar deve conter 5040 amostras, das quais 2520 são referentes aos dias não úteis e as outras 2520 relativas aos dias úteis.

Esta janela de dados é composta das amostras de sete dias úteis e sete dias não úteis, desta forma, garante representatividade equivalente aos sábados, domingos e feriados. De mesmo modo, para os conjuntos de testes foram aplicados dados equivalentes para dias úteis e não úteis. Nos conjuntos de testes são utilizadas um total de 2880 amostras para um período de oito dias, sendo 1440 amostras referente aos dias úteis e as demais relativas aos dias não úteis. Além do mais, esta composição torna robusta a metodologia quanto à ausência de classificação prévia dos dias da semana.

5.6 Detalhes da metodologia para tomada de decisão

Apresentados os critérios de escolha do equipamento, a validação da metodologia e os resultados da previsão de tensão por patamar para o referido ponto de monitoramento, neste item são destacados os resultados mais representativos das indicações referentes à tomada de decisão.

Neste contexto, a Figura 5.13 ilustra as variáveis de entrada referentes aos indicadores propostos na metodologia, DRP_{E10} e DRC_{E10} , apurados para um conjunto de 2880 amostras, relativo às grandezas de uma fase do patamar 2 do ponto de monitoramento escolhido. Este patamar foi escolhido para representar os demais, já que abrange o período do dia em que o carregamento do sistema em análise é mais elevado. As variáveis “Lc” e “Lp” são referentes às leituras nas faixas crítica e precária, respectivamente.

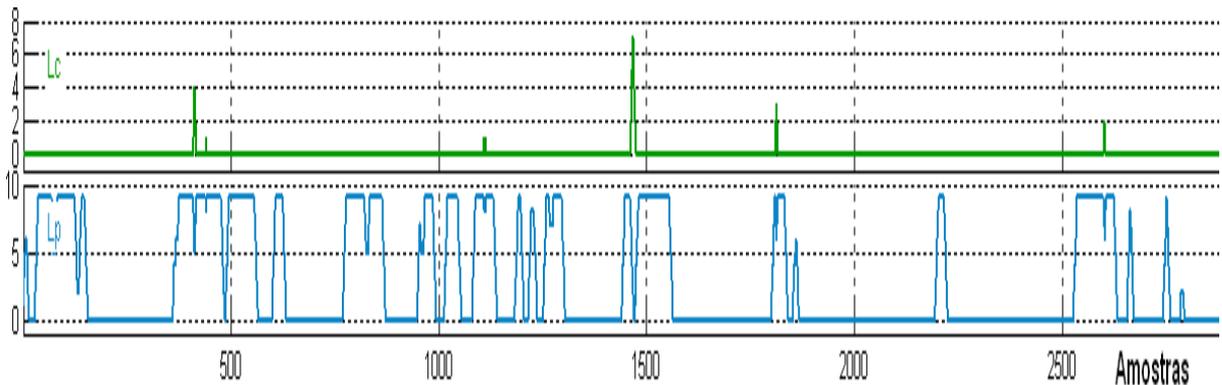


Figura 5.13 – Entradas e saída dos indicadores do Patamar 2

A importância dos indicadores para o resultado da metodologia é avaliada sobre dois aspectos: evitar a tomada de ação devido a transgressões de tensão isoladas e priorizar a tomada de ação nos casos de transgressões recorrentes no intervalo de 10 minutos. Além disso, a ponderação das saídas dos blocos relativos a transgressões de tensão e violação de indicadores resulta na indicação da ação através de sinal com poucos ruídos, característica importante para utilização dos sinais de saída da metodologia nos dispositivos inteligentes.

A partir da ponderação dos parâmetros relativos aos indicadores e tensão, na Figura 5.14, estão ilustradas as ações indicadas pela metodologia para o conjunto.

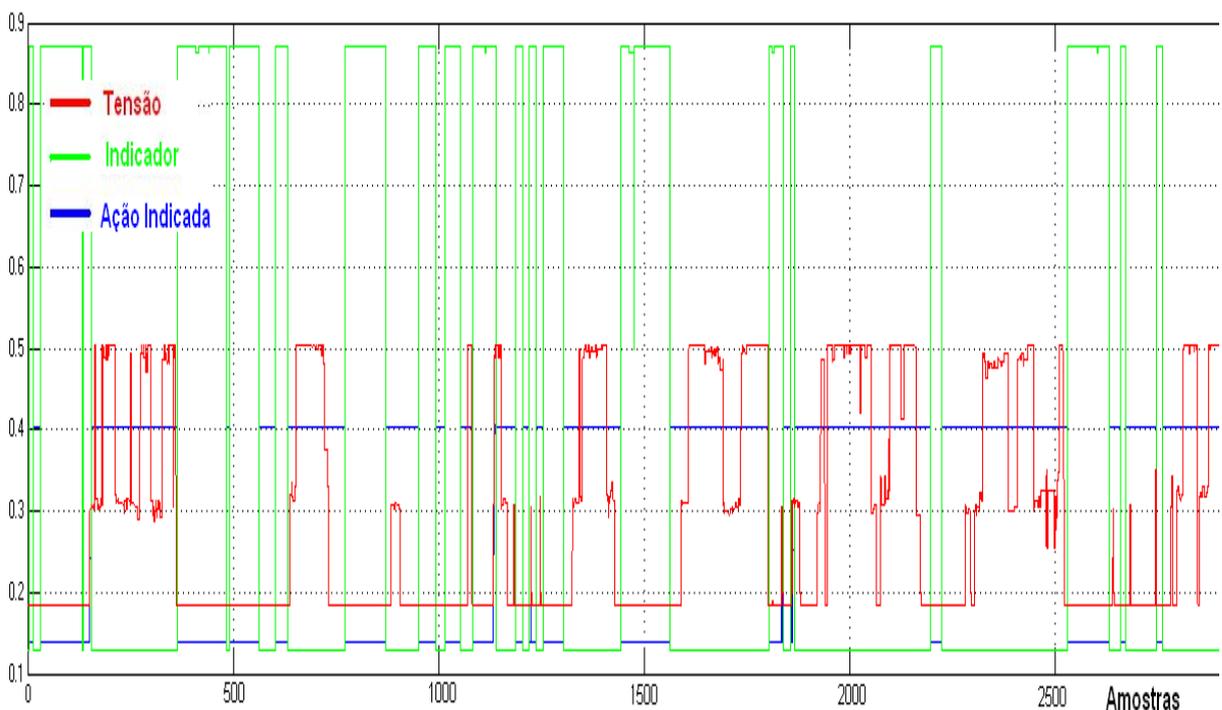


Figura 5.14 – Entradas e saída da metodologia para o Patamar 2

Através da análise dos resultados da simulação do conjunto de 2880 amostras, apresentados na Figura 5.14, identifica-se que em aproximadamente 640 das amostras as ações “Manter V” indicadas pela metodologia foram influenciadas pelo indicador. Este resultado ocorre devido às transgressões ocorridas nestas amostras não serem reincidentes, conforme parâmetros adotados pela metodologia para o intervalo de 10 amostras.

Na Figura 5.15, são apresentados os sinais relativos às principais saídas disponibilizadas pela metodologia para o conjunto: tensão prevista, ação final indicada e erro apurado. Analisando o comportamento da tensão, observa-se que os valores situam-se entre 0.89 p.u. e 0.95 p.u., por conseguinte para este conjunto de amostras não houve indicação de diminuição da tensão. Entre os valores relativos às ações indicadas, se identifica ações relativas à elevação e manutenção do nível de tensão.

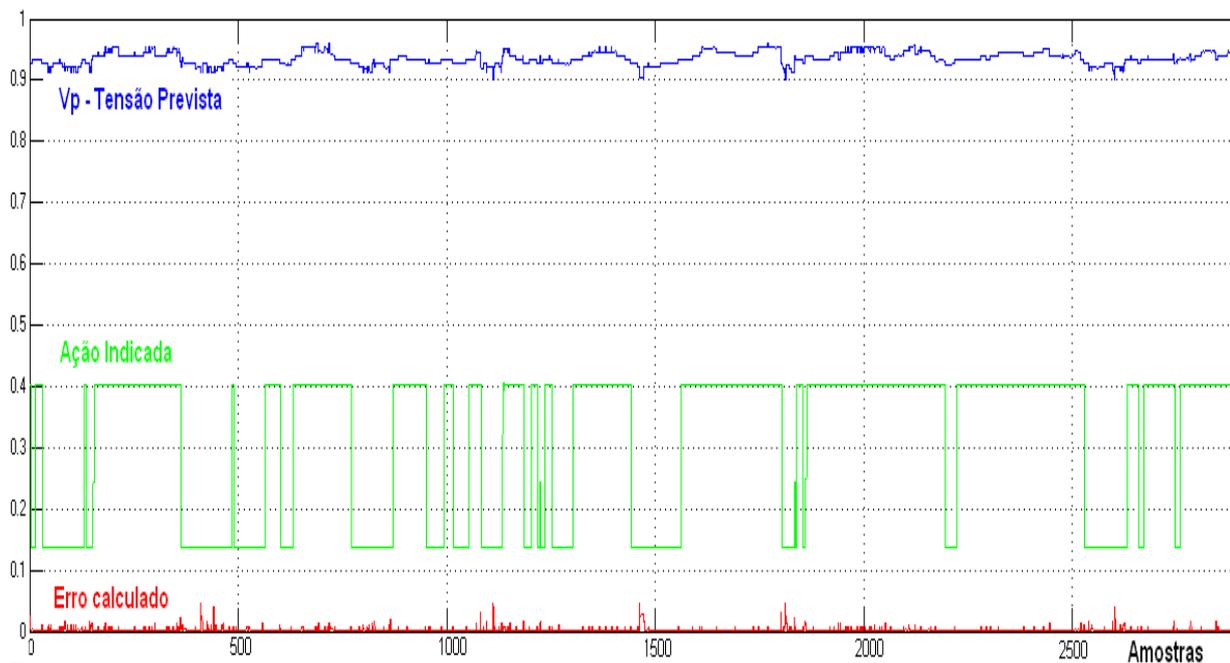


Figura 5.15 – Ações indicadas para um conjunto de teste Patamar 2

A partir da indicação da metodologia o equipamento regulador de tensão localizado na subestação a jusante do ponto de monitoramento pode tomar ações inteligentes para o ajuste de tensão. Assim, mesmo que a tensão de referência local esteja dentro da faixa adequada, podem ser tomadas ações a partir da informação referente à transgressão de tensão no trecho do ponto monitorado.

5.7 Considerações finais do capítulo

Este capítulo trouxe a aplicação da metodologia desenvolvida, inicialmente abordou o critério fundamentado nos resultados do cálculo de fluxo de potência para escolha dos pontos de monitoramento. Foram definidos critérios para elaboração do cenário e apresentados procedimentos de mineração de dados

Através de testes aplicados nos conjuntos por patamar, foi verificada a eficácia da metodologia para previsão de tensão para o minuto seguinte, cujos resultados obtidos são satisfatórios para o propósito desta aplicação.

Também foram realizadas as simulações referentes à tomada de decisão, nas quais foram utilizados dados extraídos do conjunto de medições realizadas pela distribuidora no ponto de monitoramento selecionado. Nesta aplicação são ponderadas as transgressões da faixa adequada de tensão e as violações dos indicadores, isto é, além da análise da faixa da tensão prevista são considerados os parâmetros das últimas amostras.

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões obtidas

6.1.1 Sobre o controle de tensão nas redes inteligentes

Os conceitos relativos às redes inteligentes já começaram a ser introduzidos nos sistemas de distribuição. Neste sentido, os últimos atos regulatórios do agente regulador brasileiro sinalizam as tendências para implantação destes princípios em larga escala. Diante das incertezas atreladas a este novo cenário, está o novo enfoque dado a qualidade da energia elétrica, com destaque para o aspecto do fornecimento de tensão adequada.

Uma vez implantadas as redes inteligentes, o comportamento dos usuários e as ações da agência reguladora tendem a alterar os níveis de exigência relativos à qualidade da tensão, já as distribuidoras necessitam identificar oportunidades para atender a esta expectativa. Neste sentido, é oportuno explorar a operação integrada dos diversos equipamentos, a fim de encontrar novas alternativas para o controle de tensão nos sistemas de distribuição.

Diante do cenário das redes inteligentes e das tecnologias atualmente disponíveis, identifica-se a oportunidade de intensificar o uso da Inteligência Artificial nos sistemas elétricos de distribuição, tal como a combinação do sistema *Neurofuzzy* e da Lógica *Fuzzy*, ambos explorados nesta dissertação.

O principal ganho da metodologia desenvolvida neste trabalho é atribuído à capacidade de explorar o monitoramento do sistema como um todo. Desta forma, os comandos relativos aos ajustes de tensão em um ponto específico são precedidos de análise do comportamento da tensão nos demais trechos do sistema elétrico de distribuição.

Esta interação entre dispositivos de monitoramento do sistema é uma alternativa para obter desempenho satisfatório da operação de equipamentos de controle de tensão. Portanto, com a adequação dos parâmetros dos equipamentos reguladores de tensão, a comutação de TAP pode ser direcionada ao equipamento mais eficiente, ou ainda, tomada ação complementar como o chaveamento de banco de capacitores ou o despacho de geração distribuída.

Portanto, com o controle proativo da tensão no cenário das redes inteligentes, se espera atender aos índices de qualidade regulamentados, proporcionar aumento da eficiência no uso dos ativos existentes e, por conseguinte obter ganhos de produtividade e postergação de investimentos.

6.1.2 Sobre a previsão de tensão e a tomada de decisão

Em consonância com a literatura técnica relativa à previsão de demanda, como variáveis de entrada do sistema de previsão de tensão são consideradas as informações de temperatura e as principais grandezas elétricas atreladas ao comportamento da carga. Nesse aspecto, observa-se que o comportamento da tensão não é linear, o que justifica a recorrência as técnicas de inteligência artificial para prever a tensão.

Nos estudos preliminares buscou-se identificar técnicas que possibilitem relacionar os dados numéricos aos termos linguísticos. A escolha do *Neurofuzzy* como técnica de previsão e a utilização do ANFIS como ferramenta para a implementação embasou-se, principalmente, na sua aplicação bem sucedida em sistema de previsões de carga. As simulações realizadas no início do trabalho apresentaram resultados satisfatórios para a previsão de tensão.

Além da tensão prevista para o minuto seguinte, a metodologia apresentada sinaliza a ação indicada para o ajuste da tensão por fase para um determinado ponto. Para metodologia indicar ações consistentes, que considere tanto os valores previstos como os dados históricos, tornou-se oportuna a utilização da *Lógica Fuzzy*. Através da interação de sistemas nebulosos, como o *Neurofuzzy* e a *Lógica Fuzzy*, é possível ponderar as variáveis atreladas ao comportamento da tensão.

Ao classificar a tensão através de controladores *fuzzy*, possibilitou-se ponderar a tendência de transgressão das faixas de tensão. Esta informação é relacionada aos registros de transgressão através dos dois índices propostos nesta dissertação, DRP_{E10} e DRC_{E10} . Estes dois indicadores são utilizados para ponderar a probabilidade de violação dos indicadores regulados a partir do comportamento da tensão no curtíssimo prazo.

A correlação de dados históricos e previstos diferencia a metodologia aplicada neste trabalho, pois a ação final indicada está embasada na cadeia de blocos de tomada de decisão. Estes blocos relacionam os índices de qualidade equivalentes

aos indicadores regulamentados. Deste modo, os parâmetros utilizados nos sistemas *fuzzy* ponderam as transgressões das faixas de tensão e a violação dos indicadores. Neste aspecto, a metodologia relaciona os eventos ocorridos e as tendências relativas à tensão prevista para o passo seguinte.

Em relação às principais funcionalidades relativas ao controle de tensão, na metodologia apresentada, à faixa de tensão regulada pelo PRODIST é utilizada em correlação aos parâmetros tensão de referência e insensibilidade, já os indicadores propostos nesta dissertação atuam de forma análoga a temporização.

6.1.3 Sobre os resultados obtidos

A eficácia da metodologia foi verificada através de simulações embasadas em dados reais obtidos de um alimentador do sistema de distribuição, onde os resultados auferidos indicam que a alternativa apresentada é aplicável em ferramentas de apoio operacional e relés inteligentes de controle de tensão.

Cabe destacar que durante o levantamento de dados para realização das simulações identificou-se que as distribuidoras priorizam a automação de equipamentos de proteção e manobra, embora a telemetria de reguladores de tensão seja fundamental no cenário das redes inteligentes. Outro fato a enfatizar são os problemas verificados nos processos adotados para mineração dos dados.

A utilização de dados reais possibilitou a análise dos resultados obtidos em cada bloco da estrutura utilizada na metodologia. Desta forma, foram validados os valores previstos para tensão a partir do ANFIS, no entanto, o desempenho depende de treinamento específico do sistema de previsão para cada conjunto de amostra. Já os limites adotados para os indicadores propostos e os conjuntos de regras *fuzzy* elaboradas pelo especialista para os sistemas de tomada de decisão são aplicáveis em outros conjuntos.

A partir dos resultados obtidos nas simulações, adotou-se a combinação mais adequada, que consiste na organização dos dados em quatro conjuntos referentes aos patamares de carga, contendo quantidades equivalentes de amostras para dias úteis e não úteis. Com esta configuração é possível realizar o treinamento do sistema ANFIS a partir da janela de dados atualizados. Nesse aspecto foi possível identificar que, no conjunto de amostras utilizadas nas simulações, a retirada da

variável de entrada referente à temperatura não comprometeu o resultado da previsão de tensão.

A aplicação da metodologia desenvolvida é indicada como uma variável de entrada para dispositivos inteligentes que controlam a tensão do sistema de distribuição. As funcionalidades apresentadas na metodologia podem ser incorporadas como novas funções dos equipamentos com capacidade de ajuste de tensão. Assim, no cenário das redes inteligentes, para tomar ações diferenciadas relativas à manutenção dos níveis de tensão na faixa adequada, há a alternativa de considerar as informações do próprio equipamento e de outros pontos de monitoramento do sistema de distribuição.

Contudo, conclui-se que o advento das redes inteligentes viabiliza a exploração das técnicas de previsão e tomada de decisão como alternativa complementar aos recursos aplicados no controle de tensão.

6.2 Principais contribuições deste trabalho

Considera-se que o trabalho desenvolvido apresentou as seguintes contribuições:

- uso de informações de pontos distribuídos ao longo do alimentador como subsídio para as ações de controle de tensão.
- adequação de indicadores de qualidade para viabilizar a indicação de ações proativas para o controle de tensão no curtíssimo prazo.
- inovação nos princípios de controle de tensão através da integração dos aspectos previsão e tomada de decisão.
- apresentação de alternativa para o controle de tensão que pondera a transgressão da faixa de tensão adequada e a violação dos indicadores de qualidade.

6.3 Artigos publicados

GARCIA, E. D. et al. **Voltage Forecasting in a Very Short Time Through the Application on *Fuzzy Systems***, ICREPQ – INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, Santiago de Compostela, 2012.

GARCIA, E. D. et al. **Voltage Forecasting in a Very Short Time Through the Application of Nebulous Systems**, IV SBSE – SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, Goiânia, GO, 2012.

GARCIA, E. D. et al. **Aplicação de Sistema Fuzzy para Alocação de Medidores Inteligentes em Sistemas de Distribuição de Energia**. XIV ENIE – ENCONTRO NACIONAL DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS, São Paulo, SP, 2012.

GARCIA, E. D. et al. **Alternatives for voltage control in the scenario of smart grids**. X INDUSCON – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, Fortaleza, CE, 2012.

6.4 Perspectivas de trabalhos futuros

Sugerem-se como trabalhos futuros:

- a) Explorar novas técnicas para verificar possíveis ganhos da eficiência da previsão de tensão no cenário das redes inteligentes e explorar outras combinações de variáveis utilizadas na etapa de tomada de decisão;
- b) Desenvolver modelos de relés inteligentes com funcionalidades recomendadas pela metodologia, os quais podem ser integrados aos transformadores de potência, aos reguladores de tensão, aos bancos de capacitores, aos armazenadores de energia, as unidades de geração distribuída e os transformadores de distribuição com comutador de TAP integrado;
- c) Executar plano piloto para aplicação em campo das alternativas de controle proativo da tensão apontadas neste trabalho, bem como testar novos parâmetros por patamar de carga.
- d) Ampliar a pesquisa no sentido de considerar os aspectos relacionados à geração distribuída, as informações *online* dos medidores inteligentes de BT e a reconfiguração em tempo real dos sistemas de distribuição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACAMPORA, G.; LOIA, V.; VITIELLO, A.. Exploiting Timed Automata based *Fuzzy* Controllers for voltage regulation in Smart Grids. In: **IEEE Conference Publications**, 2011. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 20 maio 2012.

AGUIAR, H.; OLIVEIRA JUNIOR. **Inteligência Computacional Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em *Matlab***. São Paulo. 2007, 320 p.

ALBU, M.M. et al. Monitoring voltage and frequency in smart distribution grids. A case study on data compression and accessibility. **IEEE Conference Publications**, 2010. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 28 abr. 2012.

ALCÂNTARA, M. V. P. Impacto da Rede Inteligente na Distribuição de Energia Elétrica no Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 7., São Paulo, 2010. **Anais...** São Paulo: ABRADDEE, 2010. 1 CD-ROM

ALCÂNTARA, M. V. P. Agenda de Pesquisa em Rede Inteligente no Programa de P&D da ANEEL. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4., Goiânia, 2012. **Anais...** Goiânia, 2012. 1 PEN-DRIVE.

ALMEIDA, A. M. F. et al. Planejamento de reguladores de tensão em redes de distribuição via algoritmos genéticos e lógica *fuzzy*. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 8., 2009, Blumenau. **Anais...** Blumenau, 2009. 1 PEN-DRIVE.

ANDRADE, L. C. M. **Abordagem Neurofuzzy para Previsão de Demanda de Energia Elétrica no Curtíssimo Prazo**. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica)–Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST – Módulo 1 – Introdução**. Brasília, 2010a.

_____. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST – Módulo 2 – Planejamento da expansão do sistema de distribuição**. Brasília, 2010b.

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

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

_____. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica n° 0044/2010–SRD/ANEEL**. Brasília, 2010e.

_____. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n° 414**. Brasília, 2010f.

_____. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n° 502**. Brasília, 2012a.

_____. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Agenda Regulatória Indicativa da ANEEL para o biênio 2012/2013**. Brasília, 2012b.

_____. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n° 482**. Brasília, 2012c.

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

BELHADJ, C. A. et al. Voltage stability estimation and prediction using neural network. In: **IEEE Conference Publications**, 1998. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 28 abr. 2012.

BERNARDES, D. F. et al. Estudos da Resolução 505/2001 da ANEEL e Análise de sua Aplicabilidade. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 9., 2011, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá, 2011. 1 PEN–DRIVE.

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

BEZERRA, U. H. et al. **Sistema distribuído de monitoramento da qualidade da BORBA, B. S. C. Modelagem integrada da introdução de veículos leves conectáveis à rede elétrica no sistema energético brasileiro**. 2012. 179 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético)–Universidade Federal do rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

BOTTURA, F. B. et al. **Avaliação e monitoramento das variações de tensão ao longo de um sistema de distribuição de energia elétrica empregando redes neurais artificiais**. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 9., 2011, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá, 2011. 1 PEN–DRIVE.

CAMPOS, R. J. **Previsão de series temporais com aplicações as séries de consumo de energia elétrica**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

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

CHESSMORE, D. T. et al. **Voltage–Profile Estimation and Control of a Distribution Feeder**. In: **IEEE Conference Publications**, 2009. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 20 maio 2012.

COLNAGO, G. P. et al. Desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento em tempo real da tensão da rede com acesso remoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 18., 2010, Bonito. **Anais...** Bonito, 2010. 1 PEN–DRIVE.

CORMANE, G. E. et al. Qualidade da Energia Elétrica no contexto de Smart Grid. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 9., 2011, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá, 2011. 1 PEN–DRIVE.

CUNHA, A. P. **Bases Conceituais de implantação das Redes Elétricas Inteligentes de Distribuição de Energia Elétrica**. 2011. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências**. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 692 p.

DUARTE, S. X. et al. Dispositivo regulador portátil para redes de distribuição de baixa tensão. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 9., 2011, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá, 2011. 1 PEN–DRIVE.

ELBURG, V. H. Medição inteligente e feedback a consumidores residenciais. **Revista Eletricidade Moderna**, São Paulo: Aranda Editora, n. 441, p. 106–114, dez./2010.

FARAG, H. E.; EL–SAADANY, E. F.. A Two Ways Communication–Based Distributed Control for Voltage Regulation in Smart Distribution Feeders. **IEEE Journals e Magazines**, 2012. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 18 jul. 2012.

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

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

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

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

GARCIA, E. D. **Avaliação de Curvas de Carga Típicas para Aplicação de Tarifa Diferenciada Horária por Alimentador**. 2010. 191 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica)–Universidade do Vale dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

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

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

_____. Aplicação de Sistema *Fuzzy* para Alocação de Medidores Inteligentes em Sistemas de Distribuição de Energia. In: ENCONTRO NACIONAL DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS, 14., São Paulo, 2012. **Anais...** São Paulo: Arandanet, 2012c. 1 PEN–DRIVE.

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

HAUTTEKEETE, L. et al. Introducing Smart grids in residential contexts: Consumers' perception of smart household appliances. **IEEE Conference Publications**, 2010. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 20 maio 2012.

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

JANG, S. R. ANFIS: adaptive–network–based *fuzzy* inference system. **IEEE Journals e Magazines**, 1993. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 28 abr. 2012.

JANNUZZI, A. C. **Regulação da qualidade de energia elétrica sob o foco do consumidor**. 2007. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

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

KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. **Estimação de Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 2009. 230 p.

KNAK NETO, N. **Sistema Multivariável para avaliação de desempenho e estabelecimento de limites de continuidade do fornecimento de energia utilizando a Lógica Fuzzy**. 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

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

LAMIN, H. **Medição eletrônica em baixa tensão: aspectos regulatórios e recomendações para implantação**. 2009. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

LIMA, C. A. F.; JANNUZZI, G. M.. Planejando o mercado de smart grid: regulamentação e compromissos com o cliente–consumidor. In.: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 21., 2011, Florianópolis. **Anais...** Disponível em: < <http://www.xxisnptee.com.br/site/>>. Acesso em: 22 jun. 2012.

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

MALANGE, F. C. V. **Rede Neurofuzzy–Wavelet para Detecção e Classificação de Anomalias de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência**. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

MARTINHO, E. **Distúrbios da Energia Elétrica**. São Paulo: Editora Érica, 2009. 140 p.

MARTINS, L. F. G. **Metodologia para despacho de fontes de gd a biogás em redes de distribuição utilizando lógica fuzzy**. 2012. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

MASSELLI, Y. M. C. **Proposta de um modelo de rede Neurofuzzy–polinomial otimizado por algoritmos de enxame aplicado a previsão**. 2009. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

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

MCBEE, K. D.; SIMOES, M. G. Benefits of utilizing a Smart Grid monitoring system to improve feeder voltage. IEEE Conference Publications, 2009. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 13 out. 2011. .

_____. Utilizing a Smart Grid Monitoring System to improve Voltage Quality of Customers. **IEEE Journals e Magazines**, 2012. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 13 maio 2012.

MELLO, A. P. C. et al. Definição do perfil de tensão ideal para operação de redes de distribuição. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA – CIDEL, 2010, **Anais...**Buenos Aires, 2010. 1 CD-ROM.

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

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

MORAIS, H. G. V. **Gestão de Recursos Energéticos nas Smart Grids**. 2010. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2010.

NASCIMENTO, L. et al. **Algoritmo de Detecção e Correção de Outliers para Previsão de Carga**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4., Goiânia, 2012. **Anais...** Goiânia, 2012. 1 PEN-DRIVE.

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

OLIVEIRA, J. A. N. et al. **Um simulador trifásico para avaliação off-line da atuação de bancos de reguladores de tensão em alimentadores de distribuição**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. , 19., 2010, São Paulo. **Anais...**, São Paulo, 2010. 1 CD-ROM.

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

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

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

PEREIRA, L. E. S. **Metodologia intervalar para tratamento de incertezas em problemas de fluxo de potência**. 2011. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

PINHEIRO, T. M. M. et al. **Regulação por Incentivo: instrumentos para assegurar níveis desejáveis de qualidade do serviço.** In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 9., 2011, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá, 2011. 1 PEN-DRIVE.

REZENDE, R. Aplicação de Lógica Nebulosa no monitoramento em tempo real da estabilidade de tensão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4., Goiânia, 2012. **Anais...** Goiânia, 2012. 1 PEN-DRIVE.

ROCHA, D. C. et al. **Avaliação da Distribuição no Tempo de Níveis Precários e Críticos de Tensão.** In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 8., 2009, Blumenau. **Anais...** Blumenau, 2009. 1 PEN-DRIVE.

ROSA, Agostinho N. et al. Projeto SAME: uma experiência de sucesso da CEB Distribuição S/A para automação do faturamento e redução das perdas não-técnicas de seus maiores clientes. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 18., Olinda, 2008. **Anais...** Olinda, 2008. 1 CD-ROM

RUSH, Peter. **Proteção e Automação de Redes – Conceito e Aplicação.** Tradução: JARDINI, José Antônio. São Paulo: Editora Blucher: Schneider, [2011].

RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter. **Inteligência artificial.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

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

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

SILER, W.; BURCKLEY, J. J. **Fuzzy Expert System and Fuzzy Reasoning.** Hoboken: Ed. John Wiley & Sons, 2005.

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

SILVA, L. E. Sistema Web para supervisão e predição de frequência no contexto de Smart Grids. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4., Goiânia, 2012. **Anais...** Goiânia, 2012. 1 PEN-DRIVE.

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

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

SRD, ANEEL. **Informações: níveis de tensão.** Mensagem recebida da lista SRD <srđ.qualidade@aneel.gov.br> em 23 mai. 2012.

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

TIMPE, C.; MÖLLERING, C. Eletrodomésticos inteligentes, gerenciamento da demanda e energia renovável. **Revista Eletricidade Moderna**, São Paulo: Aranda Editora, n. 439, p. 46–61, out. 2010.

TOSHIBA. **TB-R1000 – Controle para Regulador de Tensão**, Belo Horizonte, 2008. 63 p.

ULLO, S. L.; VACCARO, A.. Gossip Sensor Networks for Power Quality Monitoring in Smart Grids. In: International CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, Santiago de Compostela, 2012. **Anais...** Santiago de Compostela, 2012. 1 PEN-DRIVE.

USIDA, W. F. **Controle fuzzy para melhoria do perfil de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2007. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

WAKEFIELD, M; MCGRANAGHAN, M. Achieving Smart Grid Interoperability Through Collaboration. In: **IET Conference Publications**, 2009. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 12 mar. 2012.

WARMER, C. et al. Serviços da Web para integração de casas inteligentes em smart grids. **Revista Eletricidade Moderna**, São Paulo: Aranda Editora, n. 443, p. 134–138, fev. 2011.

WEBER, L.; KLEIN, P. A. T. **Aplicações de lógica fuzzy em software e hardware**. Canoas: ULBRA, 2003. 112 p.

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

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

_____. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. **IEEE Journals e Magazines**, 1973. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 12 mar. 2012.

ZHABELOVA, G., VYATKIN, V. Multi-agent Smart Grid automation architecture based on IEC 61850/61499 Intelligent Logical Nodes. **IEEE Journals e Magazines**, 2011. Disponível em: <<http://www.iee.org.br>>. Acesso em: 28 abr. 2012.

APÊNDICES

Apêndice A – Lógica Fuzzy

Este apêndice tem o propósito de abordar de forma sintetizada os princípios básicos da Lógica *Fuzzy*, para possibilitar o entendimento da teoria “*fuzzy*”. Atualmente estão disponíveis um elevado número de bibliografias que tratam o tema, neste sentido referencia-se as obras de Zadeh (1965 e 1973), Weber (2003), Siler (2005), Simões (2007) e MathWorks (2012).

Mesmo com a expressiva evolução tecnológica, ainda presencia-se um descompasso entre a capacidade criativa na forma de pensamento humano e a possibilidade de solução proporcionada pelos sistemas computacionais. Isto deve-se principalmente a forma incerta e difusa do raciocínio humano, frente a maneira precisa e binária das máquinas. *Fuzzy*, em inglês, é o termo utilizado para expressar esta forma de raciocínio aproximado, impreciso, duvidoso, nebuloso. Uma série de tutoriais da *IEE Power Engineering Society*, assim como outras entidades conceituadas na área científica, tem difundido a aplicação de Lógica *Fuzzy* no SEP.

A teoria de conjuntos nebulosos foi formalizada matematicamente em 1965, por Zadeh, este mesmo autor lançou em 1973 a lógica nebulosa. Assim a Lógica *Fuzzy* é uma técnica que possibilita incorporar a forma humana de pensar em valores compreensíveis pelos computadores, ou seja, a lógica nebulosa é bem mais genérica que a lógica bivalente. Diferentemente da álgebra booleana, esta propriedade multivalente da lógica *fuzzy* contempla o tratamento da indefinição, ou seja, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1.

Diante destas condições, uma variável pode assumir valores intermediários, de modo que represente adequadamente as indefinições contidas em uma informação. Este comportamento resulta do conjunto de regras nebulosas que representam o conhecimento, possibilitando manipular variáveis linguísticas e numéricas, simultaneamente. A estrutura utilizada nas regras *fuzzy* facilita o entendimento, já que aproxima-se da linguagem usada pelos especialistas. Por isto, esta lógica é frequentemente utilizada nas situações de difícil representação matemática do sistema.

O grau de pertinência de um determinado valor em relação ao termo linguístico é atribuído através das funções de pertinência. Em referência a bibliografia especializada adota-se as funções padrões, dada a correlação ao

pensamento humano e o custo computacional de processamento. Na Figura 1 estão apresentados os formatos padrões das funções representativas das variáveis linguísticas.

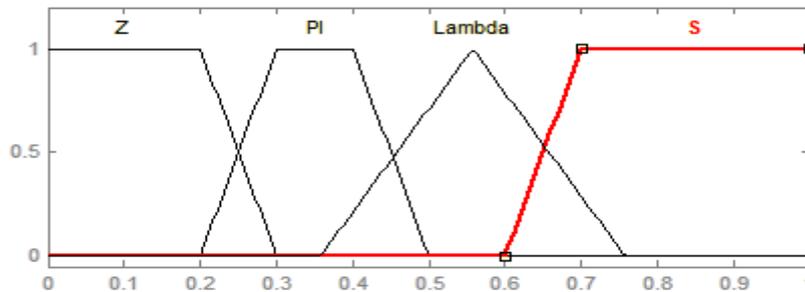


Figura 1 – Funções de pertinência padrões

Tradicionalmente um sistema lógico *fuzzy* pode ser representado pela estrutura básica apresentada na Figura 2, a qual é composta pelas etapas de *fuzzificação*, base de regras, inferência *fuzzy* e *defuzzificação*.

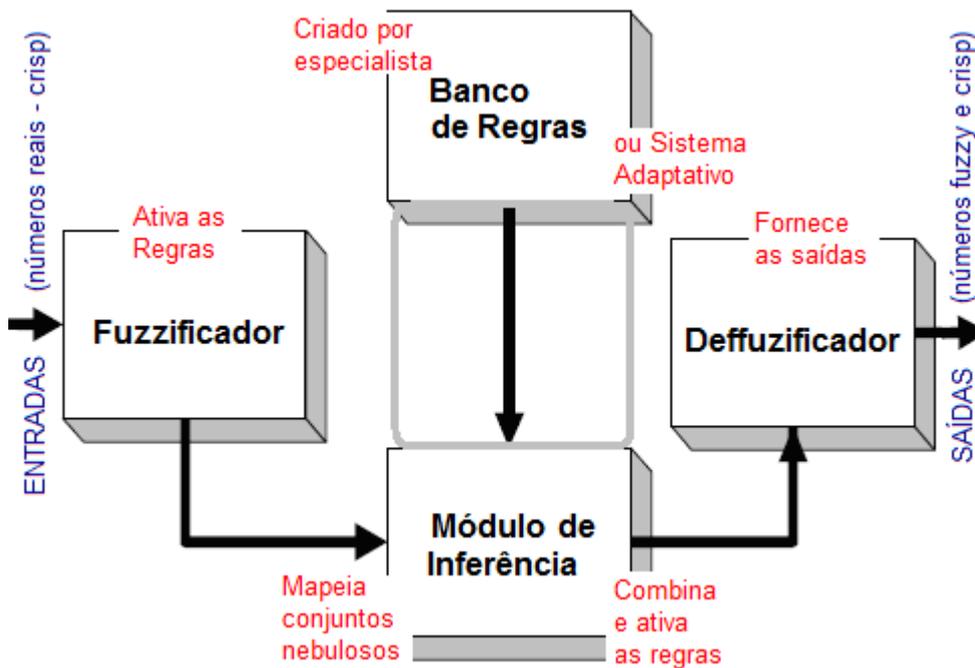


Figura 2 – Diagrama de um sistema nebuloso

Maiores detalhes sobre números *fuzzy* (*crisp*), conjuntos *fuzzy*, operações *fuzzy* e métodos de inferência podem ser consultados nas referências supracitadas.

O processo de *defuzzificação* pode ser realizado por diferentes métodos, logo, o número de operações aritméticas, a complexidade de processamento *fuzzy* e

os valores convertidos, estão atrelados a forma escolhida. Dentre os métodos de *defuzzificação* mais práticos, estão: centro de gravidade ou centróide, centro da área, *defuzzificação* por altura, centro de maior área, mais significativo dos máximos e centro de máximo. Nas aplicações mais precisas utiliza-se o método centróide, o qual foi adotado nesta dissertação e está ilustrado na Figura 3.

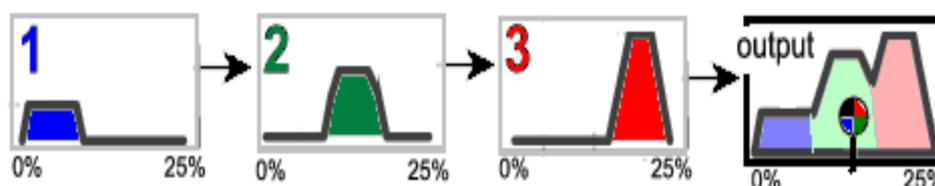


Figura 3 – Exemplo do método de *defuzzificação* Centro de Gravidade

Um dos principais componentes de um sistema *fuzzy* são as regras, as quais são elaboradas a partir da lógica “SE” e “ENTÃO” na forma normalizada para a operação “AND”. Para obter-se conclusões sobre o conjunto de regras são aplicados os mecanismos de inferência *fuzzy*, os quais estão subdivididos em quatro métodos de raciocínio *fuzzy*: *Mamdani*, *Larsen*, *Tsakamoto* e *Takagi–Sugeno*. Destes o primeiro e o último são os mais utilizados, sendo que a diferença preponderante entre estes é que no sistema *Sugeno* as funções de pertinência de saída são lineares e ou constantes. A seguir é apresentado exemplo da composição e inferência destes dois sistemas.

Mamdani: Se (x é A) e (y é B) Então (z é C)

Sugeno: Se (x é A) e (y é B) Então $z=p.x+q.y+r$

Neste caso, A e B são variáveis linguísticas e p, q e r são as variáveis consequentes numéricas. Contudo, a Lógica *Fuzzy* é considerada eficiente para o trabalho com informações classificadas como incertas, imprecisas, inexatas, difusas, nebulosas, tratadas através de uma sistemática rigorosa. Desta forma, é aplicável nas situações em que a representação matemática do problema é complexa, pois com ela é possível realizar o mapeamento não-linear de um conjunto de dados de entrada e saída. As relações entre as variáveis do sistema são representadas pelo conjunto de regras que compõem o modelo *fuzzy*. Estas regras são compostas da parte antecedente, referente à condição da regra e por outra parte denominada consequente, relacionada à conclusão da regra.

Apêndice B – Sistema Neurofuzzy

Neste apêndice, as explicações sobre sistemas *fuzzy* são ampliadas com o objetivo de fundamentar a criação de regras através de sistemas adaptativos, neste caso, as Redes *Neurofuzzy*. Nesta aplicação os parâmetros são implantados através do emprego do sistema adaptativo *fuzzy*, o ANFIS, entre outros recursos disponíveis no *Matlab*[®]. Entre as várias literaturas que exploram esta técnica, nesta dissertação, referencia-se as principais obras com abordagem prática, como Jang (1993), Aguiar (2007), Simões (2007) e MathWorks (2012).

Dadas as características diferenciadas das Redes *Neurofuzzy*, esta tecnologia se destaca entre as técnicas de inteligência artificial, pois agrega os benefícios das redes neurais aos recursos da Lógica *Fuzzy*. Portanto, os modelos *Neurofuzzy* são representações dos sistemas *fuzzy* na forma de redes passíveis de treinamento equivalente ao aplicado nas RNA. Desta forma, tem a capacidade de gerar regras (SE, ENTÃO) a partir de algoritmos de aprendizado geralmente embasado em informações numéricas históricas, por conseguinte, explora a habilidade adaptativa das redes neurais.

Entre as características mais importantes da Lógica *Fuzzy* e do Sistema *Neurofuzzy* está a aptidão de relacionar dados quantitativos e qualitativos, com destaque para as aplicações com sistemas não-lineares de comportamento variável no tempo. Dada a habilidade de aprender e adaptar-se ao mundo real, estes sistemas são ideais para aplicações práticas como a identificação de sistema, predição, classificação e controle.

Neste trabalho foram explorados os recursos do ANFIS, o qual utiliza modelos de inferência do tipo *Sugeno* e realiza treinamento por conjugação de técnicas de gradiente e mínimos quadrados. Neste caso, a arquitetura é composta de 5 camadas, cujos nós das camadas 1 e 4 são adaptativos. Assim sendo, cada camada realiza um processo específico na inferência da saída do sistema, onde os nós situados na mesma camada desempenham tarefas similares. Na Figura 4 está representado o diagrama tradicional adaptado de Jang (1993), cuja configuração destaca as funcionalidades de cada camada.

$$\begin{aligned} \text{Regra 1: SE } x_1 \text{ é } A^1_1 \text{ e } x_2 \text{ é } A^1_2 \text{ ENTÃO } f_1 &= p_1 x_1 + q_1 x_2 + r_1 \\ \text{Regra 2: SE } x_1 \text{ é } A^2_1 \text{ e } x_2 \text{ é } A^2_2 \text{ ENTÃO } f_2 &= p_2 x_1 + q_2 x_2 + r_2 \end{aligned}$$

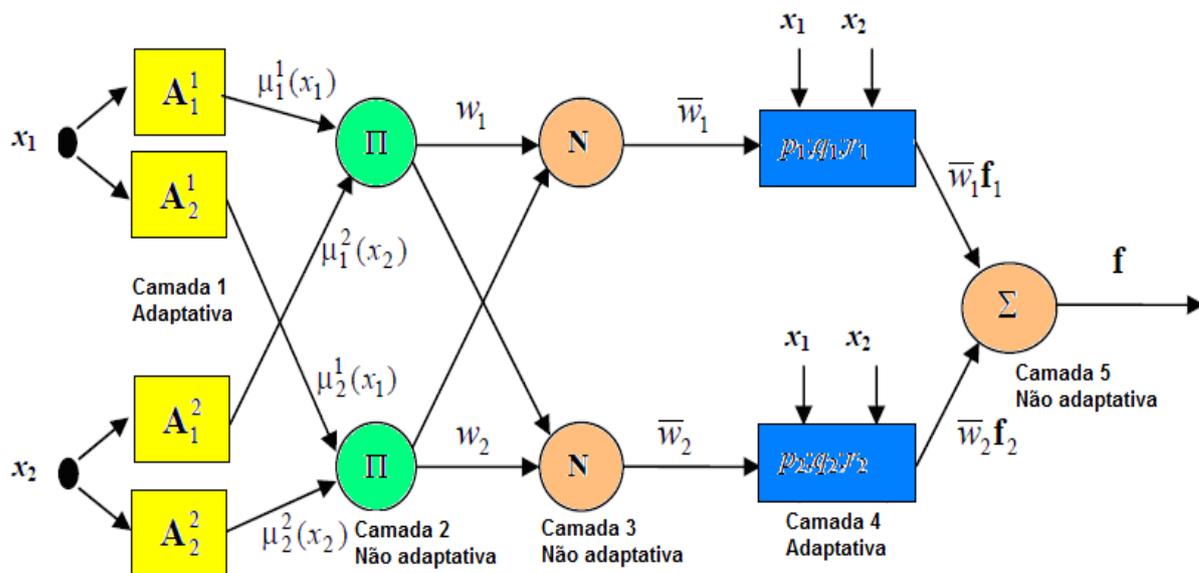


Figura 4 – Diagrama da configuração de um modelo ANFIS
Fonte: Jang (1993)

De forma equivalente a configuração apresentada anteriormente, na Figura 5 o diagrama é ilustrado no formato de arquitetura de rede.

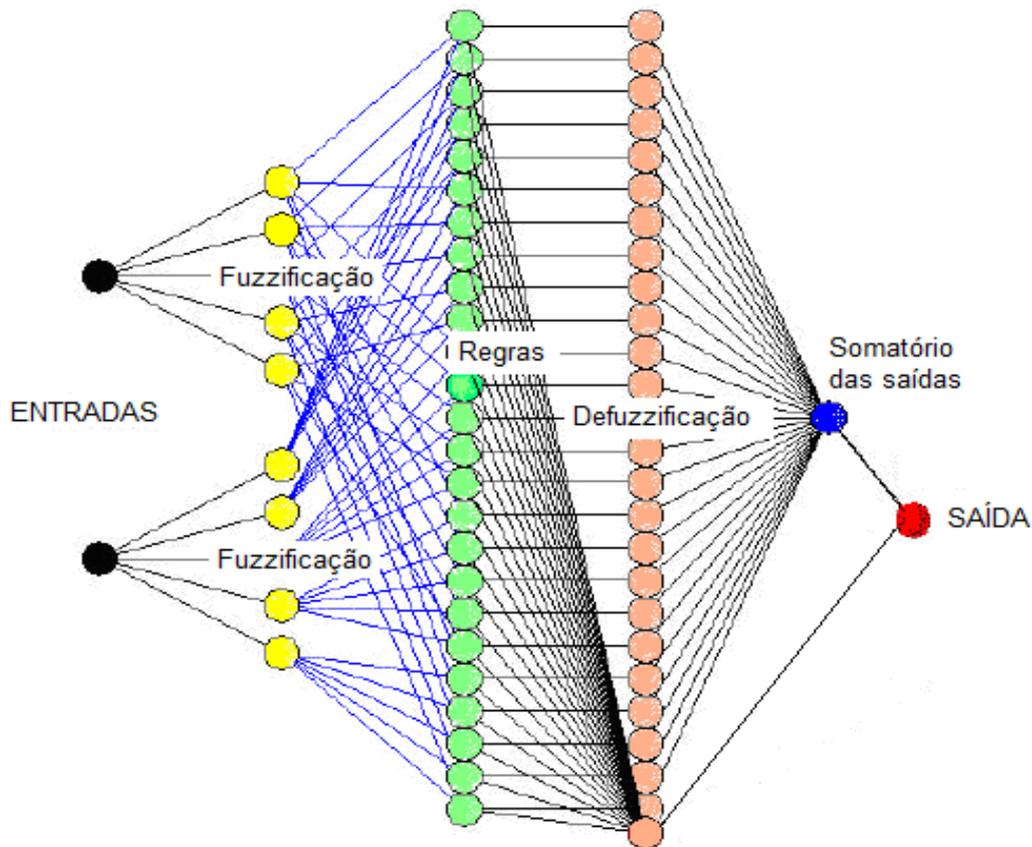


Figura 5 – Arquitetura de um Sistema *Neurofuzzy*
Fonte: Jang (1993)

Na etapa de implementação da metodologia, para compactar o diagrama principal apresentado na Figura 6 é adotada a elaboração de subsistemas. Neste sentido, a Figura 7 apresenta os blocos utilizados para apurar a tensão prevista por patamar e avaliar a faixa da tensão prevista.

Os sistemas fuzzy elaborados a partir do ANFIS para cada patamar estão implementados através dos blocos “Vp_Md”, “Vp_Mn”, “Vp_Td” e “Vp_Nt”. A classificação da tensão em faixas está implementada através dos blocos “Vp_C” e Vp_P.

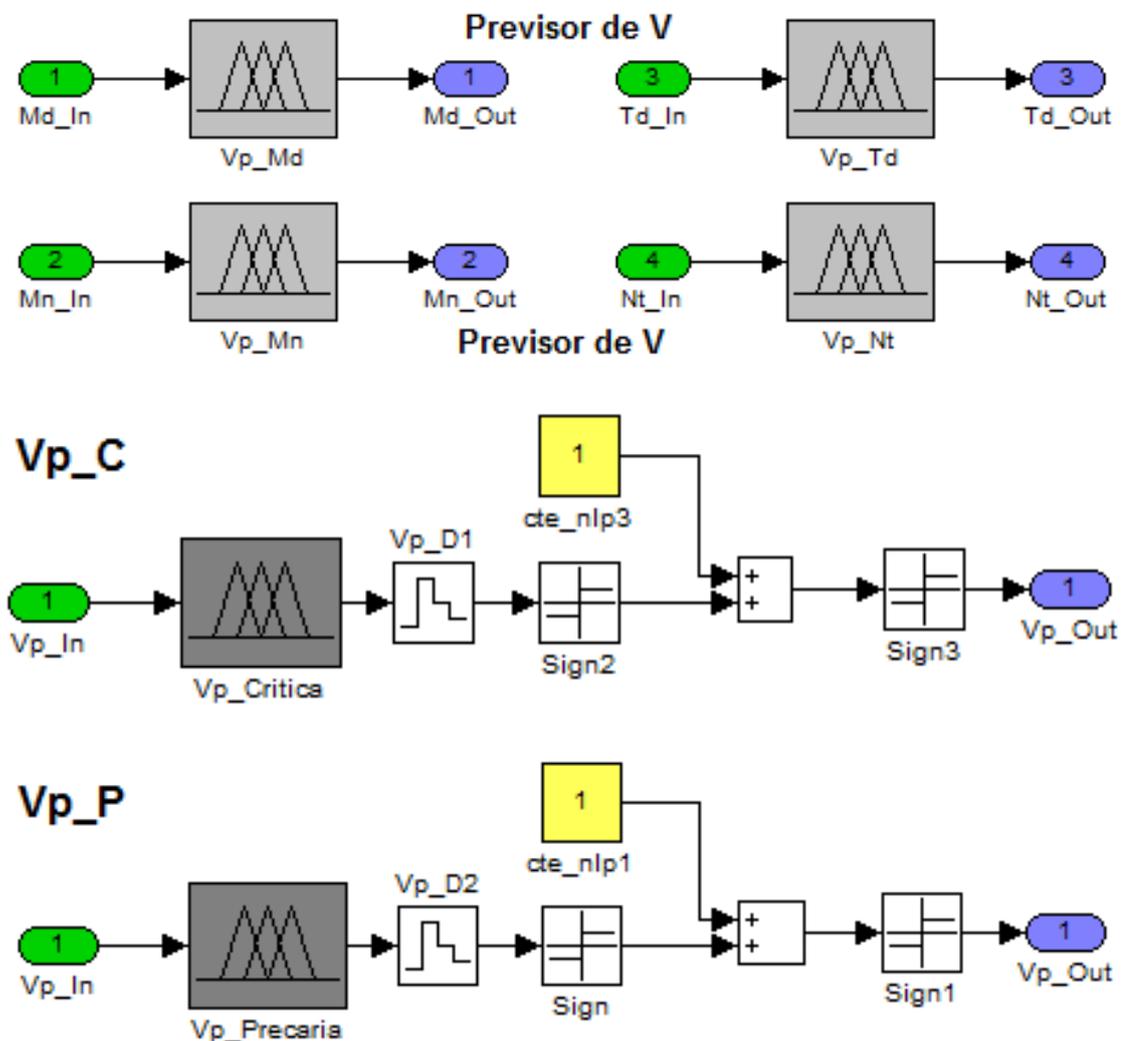


Figura 7 – Detalhes dos subsistemas do diagrama implementado

Na metodologia desenvolvida também está considerada a análise do desequilíbrio verificado no sistema, conforme proposto no PRODIST. O diagrama implementado no Simulink para esta funcionalidade está ilustrado na Figura 8.

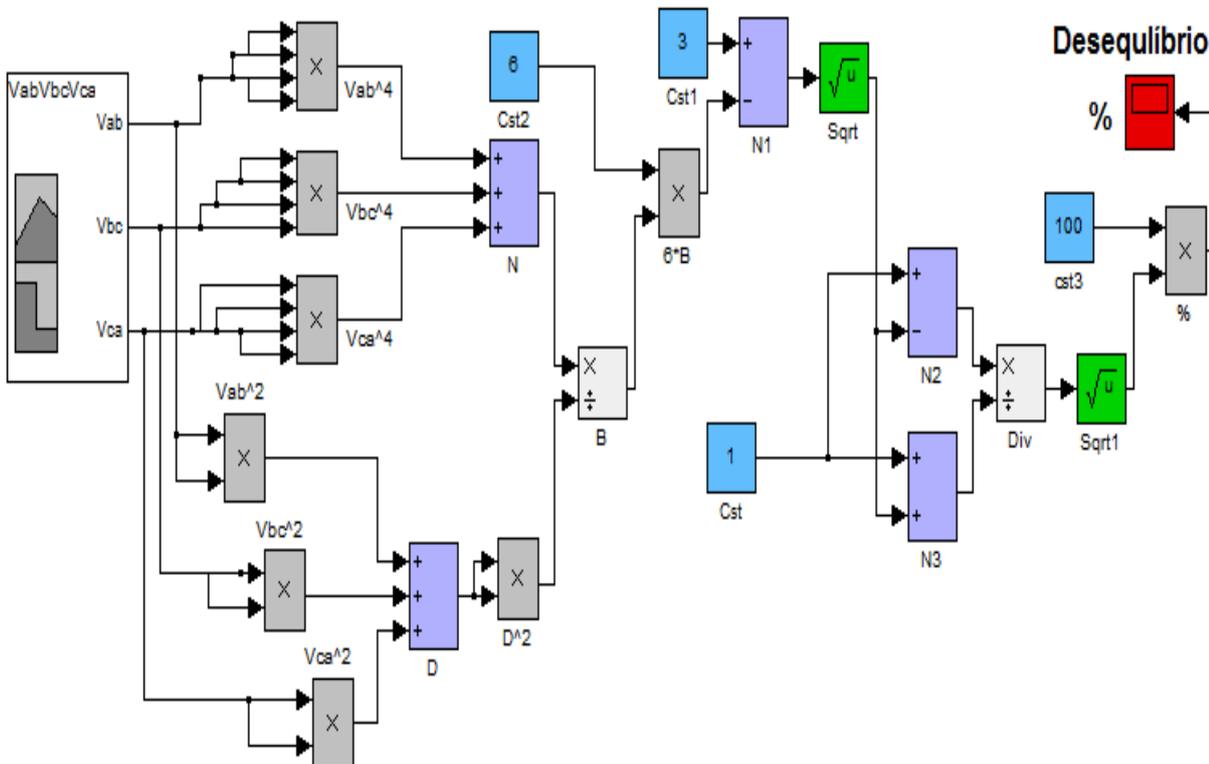


Figura 8 – Diagrama do sistema implementado para simular desequilíbrio

Os conjuntos de regras referente aos módulos 3 e 4 da metodologia desenvolvida estão apresentados na Figura 9 e Figura 10, respectivamente. Quanto ao diagrama apresentado na Figura 6, as regras apresentadas referem-se aos blocos denominados “Ação Vp” e “Ação Vh”.

1. If (Faixa_V_p is Crítica_B_V_p) and (Faixa_V_a is Crítica_B_V_a) then (Ação_V_p is Aumentar_V_p) (1)
2. If (Faixa_V_p is Crítica_B_V_p) and (Faixa_V_a is Adequada) then (Ação_V_p is Aumentar_V_p) (1)
3. If (Faixa_V_p is Crítica_B_V_p) and (Faixa_V_a is Crítica_A_V_a) then (Ação_V_p is Manter_V_p) (1)
4. If (Faixa_V_p is Crítica_B_V_p) and (Faixa_V_a is Precária_B_V_a) then (Ação_V_p is Aumentar_V_p) (1)
5. If (Faixa_V_p is Precária_B_V_p) and (Faixa_V_a is Crítica_B_V_a) then (Ação_V_p is Aumentar_V_p) (1)
6. If (Faixa_V_p is Precária_B_V_p) and (Faixa_V_a is Adequada) then (Ação_V_p is Manter_V_p) (1)
7. If (Faixa_V_p is Precária_B_V_p) and (Faixa_V_a is Crítica_A_V_a) then (Ação_V_p is Manter_V_p) (1)
8. If (Faixa_V_p is Precária_B_V_p) and (Faixa_V_a is Precária_B_V_a) then (Ação_V_p is Aumentar_V_p) (1)
9. If (Faixa_V_p is Crítica_A_V_p) and (Faixa_V_a is Crítica_B_V_a) then (Ação_V_p is Manter_V_p) (1)
10. If (Faixa_V_p is Crítica_A_V_p) and (Faixa_V_a is Adequada) then (Ação_V_p is Diminuir_V_p) (1)
11. If (Faixa_V_p is Crítica_A_V_p) and (Faixa_V_a is Crítica_A_V_a) then (Ação_V_p is Diminuir_V_p) (1)
12. If (Faixa_V_p is Crítica_A_V_p) and (Faixa_V_a is Precária_B_V_a) then (Ação_V_p is Manter_V_p) (1)
13. If (Faixa_V_p is Adequada) and (Faixa_V_a is Crítica_B_V_a) then (Ação_V_p is Aumentar_V_p) (1)
14. If (Faixa_V_p is Adequada) and (Faixa_V_a is Adequada) then (Ação_V_p is Manter_V_p) (1)
15. If (Faixa_V_p is Adequada) and (Faixa_V_a is Crítica_A_V_a) then (Ação_V_p is Diminuir_V_p) (1)
16. If (Faixa_V_p is Adequada) and (Faixa_V_a is Precária_B_V_a) then (Ação_V_p is Manter_V_p) (1)

Figura 9 – Conjunto de regras do módulo 3 da metodologia

1. If (Apura_D_R_P is Baixo_D_R_P) and (Apura_D_R_C is Baixo_D_R_C) then (Ação_V_h is Manter_V_h) (1)
2. If (Apura_D_R_P is Baixo_D_R_P) and (Apura_D_R_C is Normal_D_R_C) then (Ação_V_h is Recomendar_V_h) (1)
3. If (Apura_D_R_P is Baixo_D_R_P) and (Apura_D_R_C is Alto_D_R_C) then (Ação_V_h is Alterar_V_h) (1)
4. If (Apura_D_R_P is Normal_D_R_P) and (Apura_D_R_C is Baixo_D_R_C) then (Ação_V_h is Manter_V_h) (1)
5. If (Apura_D_R_P is Normal_D_R_P) and (Apura_D_R_C is Normal_D_R_C) then (Ação_V_h is Recomendar_V_h) (1)
6. If (Apura_D_R_P is Normal_D_R_P) and (Apura_D_R_C is Alto_D_R_C) then (Ação_V_h is Alterar_V_h) (1)
7. If (Apura_D_R_P is Alto_D_R_P) and (Apura_D_R_C is Baixo_D_R_C) then (Ação_V_h is Alterar_V_h) (1)
8. If (Apura_D_R_P is Alto_D_R_P) and (Apura_D_R_C is Normal_D_R_C) then (Ação_V_h is Alterar_V_h) (1)
9. If (Apura_D_R_P is Alto_D_R_P) and (Apura_D_R_C is Alto_D_R_C) then (Ação_V_h is Alterar_V_h) (1)

Figura 10 – Conjunto de regras do módulo 4 da metodologia

Os conjuntos de regras referente ao módulo 5 estão apresentados na Figura 11 e Figura 12, respectivamente. Quanto ao diagrama apresentado na Figura 6, as regras apresentadas referem-se aos blocos denominados “Ação Índice” e “Ação V”.

1. If (Ação_V_p is Aumentar_V_p) and (Ação_V_h is Manter_V_h) then (Ação_i_n_d_i_c_e is Recomendar_I_C) (1)
2. If (Ação_V_p is Aumentar_V_p) and (Ação_V_h is Alterar_V_h) then (Ação_i_n_d_i_c_e is Alterar_I_C) (1)
3. If (Ação_V_p is Aumentar_V_p) and (Ação_V_h is Recomendar_V_h) then (Ação_i_n_d_i_c_e is Alterar_I_C) (1)
4. If (Ação_V_p is Diminuir_V_p) and (Ação_V_h is Manter_V_h) then (Ação_i_n_d_i_c_e is Recomendar_I_C) (1)
5. If (Ação_V_p is Diminuir_V_p) and (Ação_V_h is Alterar_V_h) then (Ação_i_n_d_i_c_e is Alterar_I_C) (1)
6. If (Ação_V_p is Diminuir_V_p) and (Ação_V_h is Recomendar_V_h) then (Ação_i_n_d_i_c_e is Alterar_I_C) (1)
7. If (Ação_V_p is Manter_V_p) and (Ação_V_h is Manter_V_h) then (Ação_i_n_d_i_c_e is Manter_I_C) (1)
8. If (Ação_V_p is Manter_V_p) and (Ação_V_h is Alterar_V_h) then (Ação_i_n_d_i_c_e is Alterar_I_C) (1)
9. If (Ação_V_p is Manter_V_p) and (Ação_V_h is Recomendar_V_h) then (Ação_i_n_d_i_c_e is Recomendar_I_C) (1)

Figura 11 – Conjunto de regras relativo ao índice do módulo 5

1. If (Ação_V_p is Aumentar_V_p) and (Ação_V_h is Manter_V_h) then (Ação_V_P is Manter_V_P) (1)
2. If (Ação_V_p is Aumentar_V_p) and (Ação_V_h is Alterar_V_h) then (Ação_V_P is Aumentar_V_P) (1)
3. If (Ação_V_p is Aumentar_V_p) and (Ação_V_h is Recomendar_V_h) then (Ação_V_P is Aumentar_V_P) (1)
4. If (Ação_V_p is Diminuir_V_p) and (Ação_V_h is Manter_V_h) then (Ação_V_P is Manter_V_P) (1)
5. If (Ação_V_p is Diminuir_V_p) and (Ação_V_h is Alterar_V_h) then (Ação_V_P is Diminuir_V_P) (1)
6. If (Ação_V_p is Diminuir_V_p) and (Ação_V_h is Recomendar_V_h) then (Ação_V_P is Diminuir_V_P) (1)
7. If (Ação_V_p is Manter_V_p) and (Ação_V_h is Manter_V_h) then (Ação_V_P is Manter_V_P) (1)
8. If (Ação_V_p is Manter_V_p) and (Ação_V_h is Alterar_V_h) then (Ação_V_P is Manter_V_P) (1)
9. If (Ação_V_p is Manter_V_p) and (Ação_V_h is Recomendar_V_h) then (Ação_V_P is Manter_V_P) (1)

Figura 12 – Conjunto de regras relativo à tensão do módulo 5

ANEXOS

Anexo A – Funcionalidades de controles digitais

Tipo de grandeza	Sentido do fluxo	Função
Parâmetro	Fluxo direto e Fluxo inverso	Tensão de referência Insensibilidade Temporização Compensador de queda na linha resistivo Compensador de queda na linha reativo
Medição de demanda	Fluxo direto e Fluxo inverso	Demanda de tensão do lado carga Demanda de tensão compensada Demanda de corrente Fator de potência para demanda de potencia Demanda de potência aparente Demanda de potência ativa Demanda de potência reativa Demanda de tensão do lado fonte
Medição instantânea	Fluxo direto e Fluxo inverso	Tensão instantânea no lado carga Tensão instantânea do lado fonte Tensão de compensação de queda na Linha Corrente instantânea do lado carga TAP atual Fator de potência Potência aparente instantânea Potência ativa instantânea Potência reativa instantânea Frequência instantânea da linha
Configurações	Fluxo direto e Fluxo inverso	Número de Série do Controle Configuração de ligação do regulador Modo de operação do tempo de retardo Potência nominal do Regulador Relação de transformação de tensão Relação de transformação de corrente
Totalizador	Fluxo direto e Fluxo inverso	Contador de operações Totalizador de energia ativa Totalizador de energia reativa
Registro	Fluxo direto e Fluxo inverso	TAP Máximo TAP Mínimo Data atual Formato de apresentação da data no display
Comunicação	Fluxo direto e Fluxo inverso	Porta Remota

Anexo B – Parâmetros de ajuste de controles digitais

Ajuste	Descrição	Limites
Vrf	Tensão de referência do controle	95 – 135 Volts passo 1
Ins	Insensibilidade	+/- 0,6 – 6% passo 0,1
Tmp	Temporização	10 a 150 seg passo 1
Ur	Compensação de linha resistiva	-25 a 25V passo 1
Ux	Compensação de linha reativa	-25 a 25V passo 1
Vmi	Tensão mínima admissível.	105 a 118V passo 1
Vma	Tensão máxima admissível.	120 a 135V passo 1
Ima	Corrente máxima admissível.	0,5 a 2,0 x In passo 0,1
Int	Intervalo para registro de medições.	0 a 60 minutos passo 1
TCal	Iguala a indicação do TAP no display com a Posição Atual do comutador.	-16 a 33 passo 1
Tmax	Tap máximo atingido pelo regulador.	16 a 33 passo 1
Def	Defasamento angular.	0, -30, +30, -90, +90
Atu	Tipo de atuação do motor (Contínuo ou pulsado).	CON / PUL
Ind	Processo da aquisição da Posição Atual.	DIRET / CALC1 / CALC2
TCNM	Corrente nominal secundária do TC (A).	0,2 / 5,0
TL/I	Tipo de Temporização.	0 = Linear, 1= Inverso
ESPT	Habilita ou desabilita a geração de espontâneos.	0 a 1
End	Endereço de comunicação.	1 a 250 passo 1
Bse2	Velocidade de comunicação da porta serial 2 (Inferior).	0 a 1
Ser2	Tipo da comunicação da serial 2 (inferior).	0 a 3 passo 1
RTP	Relação do TP do regulador.	50.0 a 1210.0 passo 1
RTC	Relação do TC do regulador.	250 a 7000 passo 1

Anexo C – Fluxograma simplificado para níveis de tensão

