

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
NÍVEL MESTRADO PROFISSIONAL

FELIPE DE CARLI

**CONTROLE DINÂMICO INTELIGENTE PARA REGULADORES DE TENSÃO DE
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**

São Leopoldo
2018

Felipe De Carli

**CONTROLE DINÂMICO INTELIGENTE PARA REGULADORES DE TENSÃO DE
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada como requisito para a
obtenção do título de Mestre, pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos –
UNISINOS

Orientador: Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira

Coorientador(a): Dr. Luciane Neves Canha

São Leopoldo

2018

D291c De Carli, Felipe
Controle dinâmico inteligente para reguladores de tensão de
redes de distribuição de energia / por Felipe De Carli. – 2018.
89 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos
Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
São Leopoldo, RS, 2018.

Orientador: Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira.

Coorientador(a): Dr. Luciane Neves Canha.

1. Redes de distribuição inteligentes. 2. Reguladores de
tensão. 3. Qualidade da energia elétrica. 4. Controle dinâmico
inteligente. 5. Tensão em regime permanente. I. Título.

CDU: 621.316

Catálogo na Publicação (CIP):
Bibliotecário Alessandro Dietrich - CRB 10/2338

Este trabalho é dedicado aos meus pais que me educaram, apoiaram e me prepararam para enfrentar os desafios pessoais e profissionais..

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador do mestrado Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira pelos ensinamentos, colaboração, críticas, ajuda e principalmente flexibilidade durante a elaboração do trabalho e obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Agradeço a Universidade do Vale do Rio dos Sinos e os funcionários diretamente envolvidos pela oportunidade de cursar um mestrado de nível profissional na área de engenharia elétrica colaborando para o meu desenvolvimento profissional.

Agradeço a professora Dr. Luciane Neves Canha da UFSM pela coorientação, sugestões de melhoria da dissertação e apoio nos assuntos relacionados a pesquisa e andamento do trabalho.

Agradeço a CEEE-D e ao programa de P&D da ANEEL pelo incentivo de pesquisa e por alavancar o desenvolvimento de pesquisa aplicada no país gerando processos e serviços mais eficientes.

Agradeço ao bolsista de iniciação científica, Vinicius de Jesus, pela dedicação e ajuda durante as fases de implementação dos protocolos de comunicação e realização dos testes de validação da proposta do controle.

Agradeço a Joana De Souza Mücke pelo apoio, paciência e companheirismo durante a fase de desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao Guilherme Antonio Tedeschi de Araújo pelo incentivo ao meu desenvolvimento profissional nas áreas de tecnologia, processos, gestão, liderança e por me liberar mais cedo da empresa possibilitando desenvolver o trabalho e frequentar as aulas.

RESUMO

A geração, transmissão e distribuição de energia elétrica têm papel chave no desenvolvimento econômico de um país. A qualidade e disponibilidade da energia elétrica relacionada a distribuição tem impacto direto na economia e na qualidade de vida das pessoas. Conceitos de Redes de Distribuição Inteligentes tem ganhado cada vez mais força com o intuito de melhorar a qualidade dos serviços prestados. A tensão em regime permanente é um dos principais parâmetros de qualidade de energia elétrica em redes de distribuição e muitas vezes o seu controle requer soluções de elevada complexidade e investimento. Tensões fora de especificação tem impactos negativos para os consumidores finais, uma vez que, podem gerar danos aos equipamentos, interrupção em serviços fundamentais, e inconvenientes para a sociedade. Desta forma, o presente trabalho busca desenvolver um protótipo de controle inteligente e dinâmico aplicado para reguladores de tensão de distribuição com a capacidade de coletar informações do perfil de consumo do alimentador, realizar o auto ajuste de seus parâmetros e enviar informações para o sistema de supervisão. O protótipo dividido em um módulo de controle e módulo fuzzy que foi desenvolvido em escala de laboratório. Baseado no carregamento do alimentador, o dispositivo é capaz de calcular os parâmetros básicos de auto-ajuste, ou seja, a temporização, faixa de insensibilidade e compensações de queda na linha. Os resultados globais desse trabalho mostram que o desenvolvimento de um controle dinâmico e inteligente para reguladores de tensão é viável e pode ser aplicado em redes de distribuição reais. O cálculo dos parâmetros de temporização, tensão de referência, compensação de queda na linha melhora o perfil de tensão de uma rede de distribuição, pois minimiza as oscilações de tensão em baixa e alto carregamento da linha, conforme testes realizados com dados de um alimentador real. Entende-se que os resultados globais deste trabalho servem de fundamento para um estudo técnico-econômico de ampliação desta estrutura de controle para outros reguladores de tensão de redes de distribuição.

Palavras-Chave: Redes de distribuição inteligentes, Reguladores de Tensão, Qualidade da Energia Elétrica, Controle Dinâmico Inteligente, Tensão em regime permanente.

ABSTRACT

The electricity generation, transmission, and distribution play a role key in the economic development of a country. The quality and availability of electricity related to distribution has a direct impact on the economy and people's quality of life. Concepts of smart grids has gained more strength in order to improve the quality of services provided. Steady-state voltage is one of the main quality parameters of electrical power in distribution grids and often its control requires solutions of high complexity and investment. Out-of-specification voltage have negative impacts on end-users, as it can cause damage to equipment, outage in key services, and inconvenience to community. In this way, the present work seeks to develop a prototype of intelligent and dynamic control applied to distribution voltage regulators with the ability to collect information of the feeder consumption profile, perform the self-tuning of its parameters and send information to supervisory system. The prototype divided into a control and fuzzy modules was developed on a laboratory scale. Based on loader readings, the device is able to calculate the basic parameters of self-adjustment, ie time delay, dead band and line drop compensation. The overall results of this work show that the development of a dynamic and smart control for step voltage regulators is feasible and can be applied in real distribution grid. The calculation of the time delay, reference voltage, line drop compensation improves the voltage profile of a distribution grid, as it minimizes voltage variations at low and high line loading, according to tests performed with data from a real feeder. It is understood that the overall results of this work serve as a basis for a technical-economic study to extend this control structure to other step voltage regulators in distribution grids.

Keywords: Smart grids, Step Voltage Regulators, Electric power quality, Dynamic and smart voltage control, Steady state voltage control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Grupos de funcionalidades de automação de redes de distribuição de média tensão.	17
Figura 2 Esquemático da aplicação de um regulador de tensão.	24
Figura 3 Faixa de insensibilidade e temporização do regulador de tensão.	25
Figura 4 Diagrama esquemático de reguladores de tensão do tipo A (a) e do tipo B (b).	27
Figura 5 Fluxo de potência normal e inverso em um regulador de tensão.	28
Figura 6 Curva de duração da carga.	29
Figura 7: Relação de mestre e escravo no protocolo DNP 3.	31
Figura 8: Relação de mestre e escravo com critério hierárquico no protocolo DNP 3.	33
Figura 9 Sistema de tempo real crítico.	35
Figura 10 Sistema de tempo real com geração de dano ao processo.	35
Figura 11 Sistema de tempo real do tipo não crítico.	36
Figura 12: Variáveis de entrada do controlador.	41
Figura 13 Controle de tensão hierárquico adaptativo.	42
Figura 14 Fluxograma de trabalho proposto.	46
Figura 15 Protocolo de comunicação DNP3 implementado entre o regulador e tensão e o microcontrolador ARM.	47
Figura 16 Protocolo de comunicação entre o Módulo de Controle, regulador de tensão e o Módulo Fuzzy.	48
Figura 17 Relação hierárquica do protocolo DNP3 aplicado ao controle de tensão	49
Figura 18 Diagrama de blocos do sistema de controle local.	49
Figura 19 Exemplo de curva horária de perfil potência que será lida no RT.	50
Figura 20 Exemplo de curva horária de perfil de tensão que será lida no RT.	50
Figura 21 Exemplo de posição de curva de posição de TAP do RT.	51
Figura 22 Resumo da lógica fuzzy desenvolvida.	53
Figura 23 Função de pertinência para tensão de entrada.	53
Figura 24 Função de pertinência de variação de carga na entrada.	54
Figura 25 Declaração das bibliotecas utilizadas e registradores ModBus.	56
Figura 26 Declaração de variáveis internas do algoritmo de controle.	57
Figura 27 Algoritmo de preparação da variável de variação de carga.	57
Figura 28 Montagem das funções de entrada para cálculo da temporização.	58
Figura 29 Configuração da porta serial, protocolo Modbus e relógio de tempo real.	58
Figura 30 Regras estabelecidas para as funções de entrada.	59
Figura 31 Rotina de cálculo do parâmetro temporização.	60

Figura 32 Atualização do parâmetro temporização no Módulo de Controle.	61
Figura 33 Declaração de variáveis para o cálculo do parâmetro U_r	62
Figura 34 Cálculo do parâmetro U_r	62
Figura 35 Seleção específica do algoritmo de controle para apresentar o cálculo do parâmetro U_{ref}	63
Figura 36 Seleção específica do algoritmo de controle para apresentar o cálculo do parâmetro U_x	63
Figura 37 Controlador do regulador de tensão utilizado no desenvolvimento do trabalho.....	64
Figura 38 Protótipo do controle dinâmico inteligente de tensão.	65
Figura 39 Configuração da variável tensão do lado carga no supervisorírio Mango Automation.	66
Figura 40 Configuração em Modbus do registrador 8 para a medição da tensão lado fonte. ..	67
Figura 41 Conexão entre pontos do protocolo DNP3 e ModBus da variável tensão lado fonte.	68
Figura 42 Comunicação circular entre dispositivos da variável tensão lado fonte.	69
Figura 43 Configuração do ponto de temporização no regulador de tensão.	70
Figura 44 Configuração do point link para escrever o parâmetro temporização no controlador do regulador de tensão.....	70
Figura 45 Leitura do parâmetro temporização calculado e lido no visor do controlador do regulador de tensão.....	71
Figura 46 Alimentador de distribuição real e resultado do estudo de fluxo de potência.	72
Figura 47 Comparativo entre ajuste anterior e ajuste proposto.	73
Figura 48 Ambiente de simulação dos parâmetros de entrada da lógica fuzzy para calcular a temporização.....	74
Figura 49 Valores de potência ativa e reativa coletados do regulador de tensão pelo Módulo de Controle.	76
Figura 50 Valores de tensão e corrente coletados pelo módulo de controle.	76
Figura 51 Ganho de tensão devido aos parâmetros U_r e U_x em função da variação da corrente.	78
Figura 52 Comando de aumento de TAP segundo tensão compensada no patamar de carga elevada.	79
Figura 53 Temporização calculada pelo módulo fuzzy.....	79
Figura 54 Comparativo da tensão regulado com e sem o controle inteligente.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Diferentes abordagens para as redes de distribuição do IEEE.	20
Quadro 2 Faixa de atendimento de tensão em regime permanente segundo o PRODIST.	28
Quadro 3 Principais referências e relação com o trabalho proposto.	45
Quadro 4 Parâmetros da lógica fuzzy para a tensão na entrada.	54
Quadro 5 Parâmetros da lógica fuzzy para a função de variação da carga de entrada.	54
Quadro 6 Resultados da lógica fuzzy especificada.	55
Quadro 7 Coerência entre pontos nos protocolos ModBus e DNP3.	68
Quadro 8 Teste de comunicação entre os dispositivos e protocolos.	69
Quadro 9 Análise crítica dos resultados calculados pelo Módulo Fuzzy.	75
Quadro 10 Comparação entre os parâmetros calculados no algoritmo desenvolvido contra os cálculos manuais considerando as mesmas variáveis.	77
Quadro 11 Comparativo entre os valores de tensão máximos calculados e obtidos pelo Módulo de Controle.	77

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACO	Otimização por colônia de formigas
AG	Algoritmo genético
AGCND	Algoritmos genéticos de classificação não dominada
ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
BC	Banco de Capacitores
CHAT	Controle hierárquico adaptativo de tensão
DE	Evolução diferencial
E EI	Equipamento eletrônico Inteligente
GD	Geração distribuída
I	Corrente
IEC	Comissão Internacional Eletrotécnica - <i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	Instituto de engenharia elétrica e eletrônica - <i>Institute of electrical and electronic engineering</i>
Ins	Faixa de insensibilidade (%)
LDC	Compensador de carga de linha - <i>Line drop compensation</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MPEE	Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica
MT	Média tensão
P	Potência ativa
PGSA	Algoritmo de simulação de crescimento de árvore - <i>Plant grow simulation algorithm</i>
PIM	Programação inteira mista
PRODIST	Procedimento de distribuição do setor elétrico nacional
PSO	Otimização por nuvem de partículas
p.u.	Por unidade
Q	Potência reativa
REI	Redes elétricas inteligentes
RT	Regulador de tensão
RTC	Relação de transformação de corrente
RTP	Relação de transformação de potencial
RS	Recozimento simulado

SDEE	Sistema de distribuição de energia elétrica
SE	Subestação
TAP	Terminal de ajuste de potencial
TR	Transformador
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
U_R	Compensação de queda de linha referente a resistência da linha
U_{REF}	Tensão de referência
UTR	Unidade terminal remota
U_X	Compensação de queda de linha referente a reatância da linha
V	Tensão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa.....	14
1.2 Objetivo	15
1.3 Organização dos Capítulos	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Redes Elétricas Inteligentes Smart Grids.....	16
2.2 Reconfiguração de redes elétricas.....	18
2.3 Geração distribuída.....	21
2.4 Controle de tensão e potência reativa	22
2.5 Reguladores de tensão de distribuição	24
2.6 Supervisão e controle de reguladores de tensão (Protocolo DNP3).....	30
2.6.1 Camadas do DNP3	32
2.6.2 Arquiteturas	32
2.7 Sistemas Embarcados	34
2.7.1 Microcontroladores e microprocessadores	34
2.8 Sistemas em Tempo Real.....	35
2.8.1 Características do prazo máximo.....	36
2.8.2 Programação sequencial e concorrente	37
2.9 Confiabilidade, integridade e segurança funcional	37
2.10 Considerações finais do capítulo	38
3 TRABALHOS RELACIONADOS	39
3.1 Considerações finais do capítulo	45
4 METODOLOGIA	46
4.1 Implementação do Sistema de Supervisão no Módulo de Controle.....	47
4.2 Implementação do algoritmo de temporização no Módulo Fuzzy	56
4.3 Implementação do algoritmo de ajuste no Módulo de Controle	61
4.4 Integração com o Controle do Regulador de Tensão	64
4.5 Considerações finais do capítulo	71
5 VALIDAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	72
5.1 Estudo do caso base	72
5.2 Validação do parâmetro temporização calculado pelo Módulo Fuzzy	73
5.3 Estudo dos cenários de teste	75
5.4 Considerações finais do capítulo	81
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
6.1 Sugestão para Trabalhos Futuros.....	82

1. INTRODUÇÃO

A geração, transmissão e distribuição de energia elétrica têm papel chave no desenvolvimento econômico de um país. A qualidade do serviço prestado, bem como, o aumento da disponibilidade de energia podem alavancar a economia nos setores secundários e terciários, aumentando a geração de valor, empregos e qualidade de vida da sociedade. Por um lado, investimentos no setor elétrico são intensivos em capital, o que muitas vezes pode ser um entrave para a alocação de recursos devido as demais prioridades de um país. Por outro lado, a sociedade exige cada vez mais processos renováveis de geração de energia, com menores perdas e menor exploração de recursos de meio ambiente.

Desta forma, alternativas que melhorem a qualidade e disponibilidade da distribuição da energia, e ao mesmo tempo diminuam a necessidade de despendere recursos de elevada monta são desejáveis. Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação MCTI (2014), existe um movimento intenso de experimentação dos conceitos de redes inteligente no seguimento da distribuição visando atender essas demandas. Geradores distribuídos próximos aos consumidores, reguladores de tensão, banco de capacitores e reatores combinados com uso de automação vêm sendo usados para este fim.

Com base nos indicadores de conformidade dos níveis de tensão registrados na ANEEL, entre 2013 e 2017 foram registradas 929.489 compensações pagas por nível de tensão inadequado em regime permanente totalizando aproximadamente R\$ 74.496.591,00. Cabe ressaltar que esse levantamento inclui somente as distribuidoras com mais de 400.000 clientes. Desta forma, o impacto global considerando a totalidade das distribuidoras é ainda maior. Esses custos interferem no andamento de projetos e obras de melhoria nos sistemas de distribuição. Além disso, a imagem das distribuidoras pode ser impactada por reclamações de clientes devido aos problemas de tensão percebidos. Desta forma, o controle de tensão representa um tema importante de ser estudado e melhorado.

Com base neste contexto, abrem-se oportunidades para melhorar a qualidade de energia elétrica, diminuir perdas dos sistemas, aumentar a confiabilidade e diminuir operações desnecessárias através de controles dinâmicos de tensão aplicados aos reguladores de tensão.

1.1 Justificativa

Conforme normas brasileiras vigentes, a responsabilidade de garantir a estabilidade de tensão para o consumidor final é da concessionária de energia. Desta forma, as concessionárias estão suscetíveis a tratativas de reclamações e ressarcimento devido aos problemas de fornecimento de energia elétrica fora das especificações regulamentadas pela ANEEL.

Considerando que o perfil de consumo varia de forma sazonal, que as mudanças de alimentadores e situações de contingência afetam diretamente o perfil de tensão torna-se necessário melhorar o controle de tensão. Essas alterações da rede e perfis de consumo exigem estudos e alterações periódicas dos parâmetros dos reguladores de tensão. Por um lado, esse trabalho requer dedicação de profissionais das distribuidoras para ajustar esses parâmetros de acordo com a necessidade específica de cada rede, tornando esse trabalho oneroso. Por outro lado, agregando inteligência aos dispositivos, utilizando os mesmos equipamentos já instalados nas redes de distribuição pode-se melhorar o resultado em termos de regulação de tensão e operação dos equipamentos. Dado este contexto, justifica-se o desenvolvimento de um controle dinâmico e inteligente para reguladores de tensão das redes

de distribuição visando atenuar variações no perfil de tensão aos consumidores e, com isso, reduzindo os riscos de reclamações e multas pelo serviço inadequado.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo de controle inteligente e dinâmico aplicado para reguladores de tensão com a capacidade de coletar informações do perfil de consumo da rede, realizar o auto-ajuste.

Para isso destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Elaborar algoritmo para calcular os parâmetros de ajuste dos reguladores de tensão usando um dispositivo adequado para a aplicação;
- b) Elaborar comunicação entre a plataforma de controle escolhida e o regulador de tensão instalado;
- c) Realizar testes do controle adaptativo em escala de laboratório com um regulador de tensão real.

1.3 Organização dos Capítulos

Este trabalho está dividido em 6 capítulos considerando a introdução.

O capítulo 2 apresenta o referencial teórico, onde é realizada uma revisão sobre os principais conceitos necessários para o desenvolvimento desse trabalho. Dentre eles, destacam-se redes elétricas inteligentes, controle de tensão e potência reativa e sistemas embarcados.

No capítulo 3 são apresentando os principais trabalhos relacionados de forma direta, suas contribuições e aspectos divergentes com a implementação do protótipo de controle inteligente de tensão.

O capítulo 4 traz o método de desenvolvimento do controle inteligente. Esse capítulo apresenta a arquitetura e algoritmos em detalhes a fim de atingir o objetivo proposto neste trabalho.

O capítulo 5 apresenta os principais testes realizados para validação do método e do protótipo desenvolvido. Os testes englobam a comunicação entre dispositivos, cálculos dos parâmetros do auto ajuste e simulação em um caso base.

Por fim, o capítulo 6 traz as principais conclusões sobre o trabalho e uma breve sugestão de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão bibliográfica a seguir, propõe a base técnica para os métodos utilizados no trabalho servindo para elucidar o contexto de aplicação do trabalho.

2.1 Redes Elétricas Inteligentes Smart Grids

A denominação de Redes Elétricas Inteligentes (do termo em inglês, *Smart Grid*) é utilizada para caracterizar uma série de técnicas, metodologias e procedimentos que buscam responder às novas demandas e desafios dos Sistemas Elétricos de Potência. Esses sistemas resultam em uma transformação significativa de sua forma de operação e controle. Bernardon et. al. (2015) argumenta que as redes Elétricas Inteligentes (REI) vêm sendo impulsionadas pelos avanços nas tecnologias de automação, tecnologias da Informação (TI) e comunicação, pela maior possibilidade de integração dos equipamentos da rede e, pela mudança na forma como os serviços relacionados à energia elétrica são tratados. Nesse último aspecto, incluem-se questões como medição, automação das redes, geração distribuída com fontes renováveis, novas arquiteturas para distribuição de energia, entre outras.

Como foi exposto nos trabalhos de Brown (2008) e Ipakchi (2009) muitos conceitos estão relacionados às REI, no entanto, são objetos de estudo há bastante tempo, incluindo, por exemplo, a geração distribuída, a medição eletrônica, os sistemas de automação e comunicação específicos para redes de distribuição. A partir do ano 2000, as REI foram foco de diversos grupos, consórcios e comissões de estudo. Essas equipes visam estabelecer padrões de integração e discutir a forma como os Sistemas Elétricos de Potência convencionais, que não foram pensados como uma Rede Elétrica Inteligente, possam migrar gradativamente para esse novo conceito.

Como informa Falcão (2010), a introdução do conceito de REI produzirá uma convergência entre as infraestruturas de geração, transmissão, distribuição de energia, infraestrutura de comunicações digitais e processamento de dados. Essa convergência de tecnologias exigirá o desenvolvimento de novos métodos de controle, automação e otimização da operação do sistema elétrico. A tendência é que se utilize técnicas de resolução distribuída de problemas baseadas na utilização de multi-agentes.

Seguem abaixo algumas das características geralmente atribuídas à REI (IEA, 2011a):

- Autorrecuperação: capacidade de automaticamente detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede;
- Participação proativa dos consumidores: habilidade de incluir os equipamentos e comportamento dos consumidores nos processos de planejamento e operação da rede;
- Tolerância a ataques externos: capacidade de mitigar e resistir a ataques físicos e ciberataques;
- Qualidade de energia: prover energia com a qualidade exigida pela sociedade digital;
- Capacidade para acomodar uma grande variedade de fontes e demandas: capacidade de integrar de forma rápida uma variedade de fontes de energia de várias dimensões e tecnologias;

- Menor impacto ambiental do sistema produtor de eletricidade: reduzindo perdas e utilizando fontes renováveis e de baixo impacto ambiental;
- Resposta da demanda mediante a atuação remota em dispositivos dos consumidores;
- Viabiliza e beneficia-se de mercados competitivos de energia, favorecendo o mercado varejista e a microgeração.

Assim, as REI apresentam-se como uma alternativa inteligente aos altos investimentos exigidos para atender a demanda da forma tradicional. Elas inserem a possibilidade de geração distribuída, cogeração, veículos elétricos, automação predial, armazenamento de energia, medição instantânea e remota, capacidade adaptativa e de autorecuperação (HEYDT et al., 2009).

Desta forma, a automação tem papel importante na aplicação de conceitos de redes elétricas de distribuição inteligentes com diferentes funções de acordo com grupo de equipamentos. Essas funções vão desde o simples monitoramento do carregamento ao longo dos alimentadores até o isolamento automático de trechos danificados. Isso é realizado por meio do uso de relés inteligentes e chaves de manobra com acionamento automático e remoto. A Figura 1 apresenta um resumo destas funções.

Figura 1 Grupos de funcionalidades de automação de redes de distribuição de média tensão.

Grupo 1	1) Monitoramento de carregamento ao longo do alimentador; 2) Telecomando de equipamentos 3) Monitoramento de qualidade da energia; 4) Localização de defeito - Nível I (Chaves e Religadores)
Grupo 2	1) Manutenção preditiva focada na condição dos equipamentos
Grupo 3	1) Localização de defeito - Nível II (Chaves Religadores, AMR e/ou Localizadores de Falta Monitorados)
Grupo 4	1) Isolamento automático do trecho em falta e recomposição dos demais - Nível I (Automação local)
Grupo 5	1) Isolamento automático do trecho em falta e recomposição dos demais - Nível III; 2) Reconfiguração automática para gerenciamento dos índices técnicos.
Grupo 6	1) Controle de tensão/VAR

Fonte: Adaptado de Instituto ABRADDEE de energia (2011).

Apesar de estarem divididas em grupos, as funções são inter-relacionadas, uma vez que ações de reconfiguração, isolamento de trechos, recomposição afetam os níveis de carregamento e de tensão. Além disso, as alterações nos níveis de tensão também afetam o carregamento, podendo se tornar restrições para a realização de manobras no sistema. Isso se

deve ao fato que cargas com diferentes características reagem de forma diferente quanto aos níveis de tensão.

A implementação dessas funções e a automação dos equipamentos das redes de distribuição se dá através da aplicação de relés microprocessados, integrados aos religadores, reguladores de tensão, bancos de capacitores, entre outros dispositivos. Os relés inteligentes são a terceira geração desses equipamentos e são baseados em microprocessadores e/ou unidades terminais remotas (RTUs). Segundo Strauss (2003) eles recebem entradas analógicas provenientes de transformadores de corrente (TCs), transformadores de tensão (TPs) e transdutores em diversos painéis de manobra. Esses equipamentos também podem receber entradas digitais de contatos auxiliares ou outros dispositivos de campo ou outros EEIs. Adicionalmente, podem realizar cálculos complexos e fornecer saídas tanto para o sistema SCADA, quanto para outros instrumentos de campo ou até mesmo para executar alguns comandos, por exemplo, abrir um disjuntor.

Alguns desses relés tem a capacidade de realizar funções lógicas e executar controles a nível local. Por conta dessas propriedades, esses dispositivos vêm sendo utilizados para melhorar a confiabilidade das redes de distribuição através de detecção, análise, resposta e restauração de falhas de forma automática. Assim, as medições e cálculos em tempo real dos relés inteligentes podem ser usadas para atuar de forma reativa ou ativa frente a uma contingência em uma rede de distribuição. Destaca-se que uma abordagem proativa pode eliminar interrupções de fornecimento. Essas propriedades compõem o conceito de autorrecuperação de redes de distribuição elétrica (VIEIRA e GRANATO, 2011).

Por um lado, os conceitos de autorrecuperação são utilizados visando a continuidade do fornecimento da energia elétrica através da manobra de seccionadoras automáticas baseadas no funcionamento de relés inteligentes em redes inteligentes. Por outro lado, sugere-se que uma nova abordagem de autorrecuperação possa utilizar o controle inteligente para reguladores de tensão. É esperado que esta abordagem melhore a condição de tensão nas linhas de distribuição e, com isso, possibilite manobras automáticas antes inviabilizadas.

2.2 Reconfiguração de redes elétricas

As redes de distribuição (RD) de energia possuem características como a configuração predominantemente radial, grande quantidade de bifurcações, diferentes composições de carga (residenciais, comerciais e industriais) com variações diárias típicas, entre outras. Além disso, em uma RD, requisitos essenciais de qualidade do fornecimento de energia devem ser observados, como limites de tensão e indicadores de continuidade. Uma RD pode ter sua topologia alterada através da abertura ou fechamento de dispositivos de manobra ou de proteção, por exemplo, chaves ou religadores. A reconfiguração de redes de distribuição em regime normal de operação tem por finalidade melhorar o desempenho operacional do sistema de distribuição. Isso é realizado pela possibilidade de balanceamento de cargas entre alimentadores, além da melhoria de níveis de tensão e índices de confiabilidade, e também da redução de perdas elétricas (BERNARDON et al., 2015).

O problema de reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEEs) visando a minimização de perdas de potência ativa, ou perdas técnicas, foi analisado primeiramente por Merlin e Back (1975), e posteriormente, por Civanlar et al. (1988). Depois por Baran e Wu (1989) e, Shirmohammadi e Hong (1989), sendo os quatro artigos citados em

praticamente todos os trabalhos posteriores. O trabalho de Civanlar é baseado em técnicas exatas, sendo pouco aplicável a redes de grande porte. Já os trabalhos de Baran e o de Shirmohammadi propõem o uso da técnica heurística de permutação de ramos, que não garante o ótimo global. O trabalho de Peponis e Papadopoulos (1997) trata o problema de reconfiguração de redes usando uma técnica heurística de permutação de ramos separando o problema em duas fases. A primeira parte consiste na elaboração de um conjunto de condições técnico-econômicas factíveis aceitáveis para a rede. A segunda consiste na sequência ótima de uma série de configurações da rede modelada.

A grande diversidade de técnicas varia de acordo com a forma com que o problema de configuração é modelado, tal como: mono ou multiobjetivo, quais serão as restrições e a finalidade da reconfiguração. Por exemplo, reconfiguração emergencial mediante às faltas, reconfiguração automática e telecomandada.

Na última década, técnicas meta-heurísticas foram aplicadas com sucesso em modelos de redes maiores. O problema de reconfiguração de redes, em sua natureza, é não linear, combinatório, inteiro misto e não-diferenciável, o que faz dos Algoritmos Evolucionários escolhas atraentes para sua resolução. Entre os tipos de algoritmos evolucionários mais utilizados, destacam-se o uso de algoritmos genéticos (AG) em Zhu (2002), Mendoza et al., (2006), Carreno et al. (2008) e Ramaswamy e Deconinck (2012). No trabalho de Ramaswamy, o autor mostra que para otimizações mono objetivos, o uso de algoritmos genéticos simples é eficiente. Entretanto, quando se aumenta o número de objetivos, os algoritmos genéticos simples falham em encontrar o objetivo global, abrindo espaço para variações de métodos tais como a classificação de algoritmos genéticos não dominada (CAGND). Também se destacam as aplicações tais como, a otimização por colônia de formigas (ACO) e a otimização por nuvem de partículas (PSO) (ABDELAZIZ et al., 2005, 2009). Entre as outras técnicas meta-heurísticas empregadas, pode-se citar o recozimento simulado no trabalho de Jeon et al. (2002) e de Boicea (2017). Neste último, realizou-se uma comparação entre recozimento simulado e pesquisa tabu. Os resultados apontam para uma maior facilidade de parametrização da pesquisa tabu frente ao recozimento quando aplicada a sistemas pequenos. Além disso, sugere-se que o recozimento simulado pode ter aplicação difícil para sistemas grandes por ser uma técnica probabilística.

Ainda, ao trabalhar-se com Algoritmos Evolucionários, uma das tarefas de grande importância é a escolha de uma codificação adequada para os indivíduos da população. Uma vez que as redes de distribuição apresentam uma série de restrições, tais como garantia da radialidade do sistema, diversas codificações, diferentes técnicas foram propostas. Assim, abordagens que se beneficiem da teoria de grafos na codificação de indivíduos são indicadas, pois diminuem a busca e também evitam a verificação da existência de ciclos nos grafos (REIS, et al., 2012), (SWARNKAR et. al., 2011) e (SANCHES, 2013).

Trabalhos mais recentes apresentam a alternativa de chaves telecomandadas em ambiente de redes inteligentes tal como os trabalhos de Cavalcante (2013), Mello et al. (2012) e Bernardon et al. (2010). Há também abordagens por meio de Sistemas Multi-Agentes (MAS), em um cenário de redes inteligentes, como no trabalho de Pipattanasomporn et al. (2009) e integrações com o Sistema de Automação da Distribuição - DAS da concessionária, como no trabalho de Il-Hyung (2009).

De forma resumida, o trabalho de (BARBOSA, 2012) apresenta uma excelente tabela resumo dos principais trabalhos sobre reconfiguração de SDEEs, que foi atualizada neste trabalho (Quadro 1).

Quadro 1 Diferentes abordagens para as redes de distribuição do IEEE.

Meta-heurística	16 barras	33 barras	70 barras	84 barras	134 barras
AG	(Zhu, 2002) (Carreno, Romeno, & Padilha-Feltrin, 2008) (Lira, 2011) (Braz & Souza, 2011) (Barbosa, Alexandre, & Vasconcelos, 2013)	(Zhu, 2002) (Mendoza, López, Morales, & López, 2006) (Braz & Souza, 2011) (Guedes, 2012) (Barbosa, Alexandre, & Vasconcelos, 2013)	(Swarnkar, Gupta, & Niazi, 2011) (Braz & Souza, 2011) (Guedes, 2012) (Barbosa, Alexandre, & Vasconcelos, 2013)	(Carreno, Romeno, & Padilha-Feltrin, 2008) (Barbosa, Alexandre, & Vasconcelos, 2013) (Rupolo, 2013)	
AG + PIM		(Ramos, Exposito, Santos, & Iborra, 2005)	(Ramos, Exposito, Santos, & Iborra, 2005)		
AG + AGCND	(Ramaswamy & Deconinck, 2012)				
AG + fuzzy			(Huang, 2002)		
DE+PIM				(Chiou, Chang, & Su, 2005) (Su & Lee, 2003)	
PSO	(Abdelaziz, Mekhamer, Badr, & Mohamed, 2009)	(Abdelaziz, Mekhamer, Badr, & Mohamed, 2009)	(Abdelaziz, Mekhamer, Badr, & Mohamed, 2009)		
ACO		(Abdelaziz, Osama, Elkhodary, & El-Saadany, 2005)	(Abdelaziz, Osama, Elkhodary, & El-Saadany, 2005)		
RS	(Boicea, 2017)	(Jeon, Kim, Kim, & Shin, 2002)			
PGSA	(Rao & Sivanagaraju, 2010)		(Rao & Sivanagaraju, 2010)		
Outros	(Civanlar, J. Grainger, Yin, & S. Lee, 1988) (Boicea, 2017)	(Baran & Wu, 1989)			(Peponis & Papadopoulos 1997)

Fonte: Adaptado de Barbosa (2012).

Praticamente todos os trabalhos citados acima testam suas propostas em redes já consolidadas na literatura, aqui chamadas de redes do IEEE.

2.3 Geração distribuída

O conceito de geração distribuída refere-se a uma fonte de energia elétrica diretamente conectada à rede de distribuição próximo aos pontos de consumo. A geração distribuída pode ser classificada em função da potência de acordo com os seguintes patamares:

- Micro GD: menos de 10 kW;
- Pequena GD: entre 10 kW e 500 kW;
- Média GD: entre 500 kW e 5 MW;
- Grande GD: entre 5 MW e 50 MW.

Para o IEEE, geração descentralizada é uma central de geração pequena o suficiente para estar conectada a rede de distribuição e próxima do consumidor. No Brasil, geração distribuída foi definida de forma oficial através do Decreto nº 5.163, de 30 de Julho de 2004, publicado pela ANEEL (2004), e foi definida da seguinte forma:

Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados (...), conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento: I hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e II termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, (...). Parágrafo único. Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do caput." ANEEL (2012).

A geração distribuída atua complementando o fornecimento de energia elétrica realizado pelo sistema, contribuindo para que a oferta de energia seja suficiente para atender a demanda. Em 2001 a demanda por energia, aliada ao baixo nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas, explicitou o déficit de energia que apresentava o Brasil. Assim, o governo precisou exercer algumas medidas para administrar a crise. Em abril de 2001, foi criada a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica – CGE, que previa soluções emergenciais visando um rápido aumento na oferta de eletricidade e na adoção de novos programas de eficiência energética (BAJAY e BADANHAN, 2002).

Segundo Driemeier (2009), a geração distribuída possui as seguintes vantagens:

- A GD reduz as perdas no sistema de distribuição, aumentando sua eficiência;
- O aparecimento de novas tecnologias que permitem e flexibilizam a GD;
- A GD possibilita o uso de insumos regionais para geração de energia;
- O aparecimento de restrições técnicas, ambientais e econômicas para expansão da geração centralizada;
- A necessidade de busca pela redução tarifária;
- A necessidade de aumento da eficiência em processos industriais;
- A GD possibilita que comunidades isoladas tenham acesso à energia elétrica;

- A GD reduz os riscos de instabilidade, pois é ligada em paralelo à rede;
- A utilização da GD pode adiar ou tornar desnecessário o investimento na expansão de subestações e/ou ramais de distribuição.

Pode-se também associar a este grupo a utilização do armazenamento de energia, uma vez que uma série de pesquisas está sendo desenvolvida envolvendo a conexão dessa técnica integrada às redes de distribuição. O ganho disso reside na integração de fontes renováveis e melhoria da regulação local. A integração das fontes de geração distribuída com sistemas de armazenamento compartilhado de energia permite um melhor gerenciamento da curva de carga do alimentador, aliado a um controle do despacho das fontes de geração distribuída. Isso ocorre através do armazenamento da energia gerada em horários de baixo consumo para utilização em horário de maior demanda (CAPUCHIM, 2016).

As desvantagens da GD também devem ser consideradas, com destaque para as seguintes:

- A maior complexidade da coordenação da proteção, planejamento e operação do sistema elétrico;
- Complexidade administrativa, contratual e comercial;
- Maior custo de geração de energia e de manutenção das centrais elétricas.

Ainda no mesmo trabalho foi apresentado que o racionamento de energia ocorrido em 2001 expôs a fragilidade do sistema de geração no Brasil e permitiu que a discussão sobre fontes alternativas ganhasse força. Diversos fatores possibilitaram profundamente a difusão dessa tecnologia em nosso país. Entre eles, a desestruturação do setor elétrico, o baixo custo de investimento em relação às grandes centrais elétricas, a necessidade de suprir a demanda por energia elétrica em grandes centros consumidores e em locais isolados do SIN. Somando à isso ainda existe a preocupação cada vez mais frequente e necessária com a questão ambiental (VIRGILIO, 2012).

2.4 Controle de tensão e potência reativa

O consumo de energia elétrica se subdivide em duas componentes: a potência ativa, e a potência reativa. A primeira é responsável pela realização do trabalho. A segunda é vinculada ao surgimento e manutenção dos campos magnéticos necessários ao suprimento das cargas indutivas. Essas cargas estão presentes em função da existência de motores, transformadores, fornos de indução, sistemas de iluminação, etc.

Como foi exposto por Silva (2007), os níveis de tensão estão fortemente vinculados ao fluxo e injeção de potência reativa. A queda de tensão é diretamente proporcional a potência reativa consumida pelo sistema. Um aspecto de relevância é a análise da variação da potência reativa Q necessária para a manutenção da tensão V , durante variações da potência ativa P . Supondo uma variação de potência ativa para $P + \Delta P$, Q deverá variar para $Q + \Delta Q$, para se manter V constante. Assim, para variações de potência ativa, deve-se injetar na barra uma quantidade de potência reativa para compensar a queda de tensão dado pela variação da potência ativa. Com base nisso ocorrem duas questões básicas:

- O forte impacto do fluxo de potência reativa na queda de tensão na rede;

- A influência da variação da injeção de potência reativa no controle da tensão nos barramentos.

Tendo em vista essas questões, deve-se procurar minimizar o fluxo de potência reativa pela rede, injetando-se reativo o mais próximo possível do local onde é necessário. Neste sentido, configura-se a estratégia do uso de bancos de capacitores *shunt* nas barras de carga.

Nessa perspectiva (evitar circulação desnecessária de potência reativa), a eventual utilização de bancos de capacitores situados em indústrias se mostra uma alternativa plausível. Assim haveria compensação distribuída, em regiões de provável concentração de cargas, sob a premissa de que as grandes indústrias se concentram próximas aos grandes centros urbanos. Propicia, também, a alocação da reserva de potência reativa nos geradores, situação que agrega confiabilidade operativa. Desta forma, o fluxo de potência reativa tem impacto na qualidade de tensão fornecido pela concessionária e esta deve buscar atender os parâmetros em um regime de 24 h por dia.

Tendo em vista que há necessidade de manter os níveis de tensão adequados nos sistemas de distribuição elétrica, há a necessidade de estabelecer conceitos de hierarquia de controle. O sistema de controle de tensão é subdividido em três níveis hierárquicos (Primário, Secundário e Terciário) que podem ser definidos por áreas geográficas (local, regional) e por diferentes domínios de tempo (de segundos a vários minutos). Os três níveis caracterizam-se por ações de controles específicas, que influenciam os sistemas de diferentes formas e complexidade, da seguinte maneira (ALBUQUERQUE, 2002):

- Nível Primário: refere-se às ações de controle a nível local, próximo aos equipamentos de controle e normalmente automático;
- Nível Secundário: função de coordenar os recursos do controle primário, dentro de uma determinada área de controle;
- Nível Terciário: função de otimização, coordenando as ações do controle secundário em termos de economia e confiabilidade a nível sistêmico fazendo uso de programa de otimização de fluxo de potência.

Os métodos e as ações para o controle de tensão têm três objetivos principais:

- Qualidade de tensão;
- Confiabilidade do SEP:
 - a. Perda de uma linha de transmissão (LT) ou rede de distribuição (RD) não deve perturbar o sistema, e, portanto, a reserva de potência reativa deve ser adequada;
 - b. Tensões dentro dos limites compatíveis com as especificações dos equipamentos e as faixas consideradas adequadas para atendimento do mercado;
 - c. Controle distribuído entre os recursos disponíveis, evitando excessos;
 - d. Coordenação da tensão;
- Otimização e economia na operação do sistema.

Gupta et. al. (2012) aponta que tradicionalmente, as quedas de tensão são compensadas com o ajuste da posição de TAP dos transformadores de distribuição

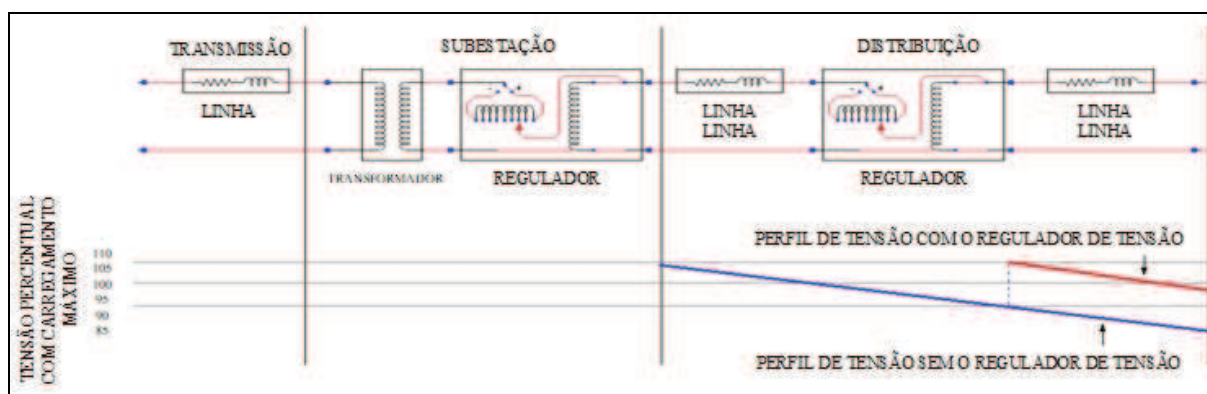
funcionando de forma integrada com outros controles. Alguns exemplos de controle são os reguladores de tensão automáticos e a instalação de capacitores em paralelo ou compensadores estáticos de reativos para regulação da potência reativa.

2.5 Reguladores de tensão de distribuição

Um regulador de tensão é um auto-transformador normalmente com 32 posições de TAP (-16...+16), podendo operar tanto na configuração de elevador de tensão como abaixador de tensão, através da inversão das bobinas do lado secundário. O comportamento deste tipo de equipamento é modelado conforme segue: compara-se a tensão de entrada do regulador com a sua tensão de referência. Caso exista diferença, o regulador propicia um ajuste de até -10% ou +10% na tensão de entrada, resultando numa tensão de saída idêntica ou mais próxima possível da tensão de ajuste. De Mello et al. (2010) sugere que o emprego do regulador de tensão é cada vez mais frequente em redes de distribuição. Esses dispositivos tem o propósito de regular a tensão em cada uma das fases da rede visando manter a tensão a um determinado nível quando submetida a uma variação de tensão fora dos limites especificados.

Para a alocação destes equipamentos ao longo das redes são disponibilizadas diversas metodologias, utilizando as mais variadas técnicas. Pereira (2010) aplica um método heurístico, considerando a minimização da queda de tensão e das perdas, além de considerar os custos de investimento. A Figura 2 apresenta um esquemático, exemplificando a aplicação de um regulador de tensão em uma rede de distribuição. Neste exemplo, se considera um trecho com nível de tensão próximo à faixa de tensão precária, em carga pesada, como ponto de inserção do equipamento.

Figura 2 Esquemático da aplicação de um regulador de tensão.



Fonte: Adaptado de Pereira (2010).

Kersting (2009) indica que ferramentas de fluxo de potência podem ser utilizadas para determinar a localização bem como os ajustes dos equipamentos. Esse método é utilizado por muitas distribuidoras que realizam esta atividade associada à experiência de profissionais que atuam no setor. Utilizando critérios próprios definidos nas empresas, os equipamentos são alocados e ajustados, entretanto, os ajustes nem sempre são realizados de maneira ótima. Mesmo assim, podem ser observados ganhos na melhoria da qualidade do fornecimento,

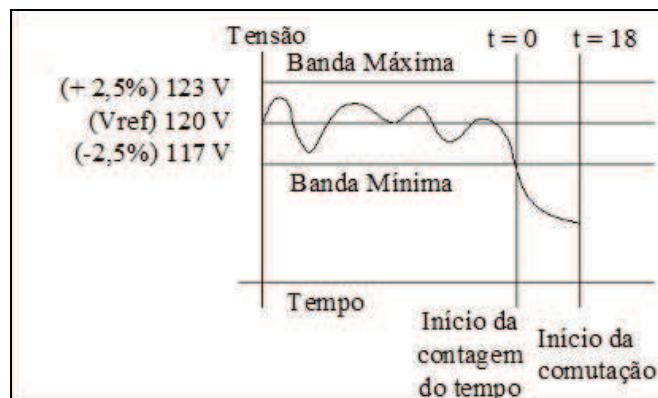
compensando os níveis de queda de tensão e possibilitando regulação de tensão. Porém dependendo das condições do ponto de instalação ou dos ajustes realizados, pode ocorrer um número elevado de comutações. No outro extremo, o regulador pode permanecer a maior parte do tempo em uma posição de TAP elevada sem condições de regulação.

Métodos e filosofias de ajustes dos equipamentos, muitas vezes transferidas de um profissional para outro, ou pela experiência adquirida ao longo do tempo apresentam regras que atendem aos critérios das distribuidoras. No entanto, existem algumas dúvidas frente a possibilidade de melhoria do controle de tensão. Por exemplo, em equipamentos que funcionam em série e coordenados, recomenda-se manter um tempo mínimo de 15 s entre os dispositivos (TOSHIBA, 2011). É discutido que o número de reguladores em série não pode ser superior a três. Há também a resistência por muitos profissionais para a utilização da temporização inversa, pois aumenta significativamente o número de comutações nos reguladores, entre outras.

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

Os parâmetros de ajuste dos reguladores de tensão são a temporização, a faixa de insensibilidade, tensão de referência e as compensações de queda de linha resistivas e capacitivas (Figura 3).

Figura 3 Faixa de insensibilidade e temporização do regulador de tensão.



Fonte: Adaptado de Toshiba (2011).

A tensão de referência corresponde ao valor objetivo da tensão na saída do controlador com objetivo de adequar-se aos transformadores a jusante do regulador. A faixa de insensibilidade delimita a tensão máxima e mínima na saída do regulador a fim de eliminar comutações desnecessárias. Deste modo variações de tensão dentro dessa faixa não acarretam em ações no regulador. A temporização determina o tempo mínimo para o regulador de tensão atuar quando a tensão de saída estiver fora da faixa de insensibilidade. As compensações de

queda de linha determinam os ganhos do regulador de tensão. Isso é realizado com base nas variações de consumo de energia ativa e reativa utilizando as curvas de carga e impedância das linhas de distribuição.

Segundo Pereira (2014), esses parâmetros representam os ajustes básicos dos equipamentos e são estabelecidos com base na tensão no ponto de instalação do regulador e nos níveis de carregamento do mesmo. Além disso, os parâmetros podem ser definidos utilizando as medições locais. Porém, de acordo com as variações sazonais da carga, com ou sem realização de manobras, podem ser necessários novos ajustes para os equipamentos. Cabe ressaltar que essas manobras podem ser programadas ou não, para manutenção, para transferência de carga ou ainda, para reconfiguração de alimentadores. Esses novos ajustes podem ter duração de algumas horas ou permanecer por vários meses, tornando essa operação com uma frequência adequada diferente para cada alimentador.

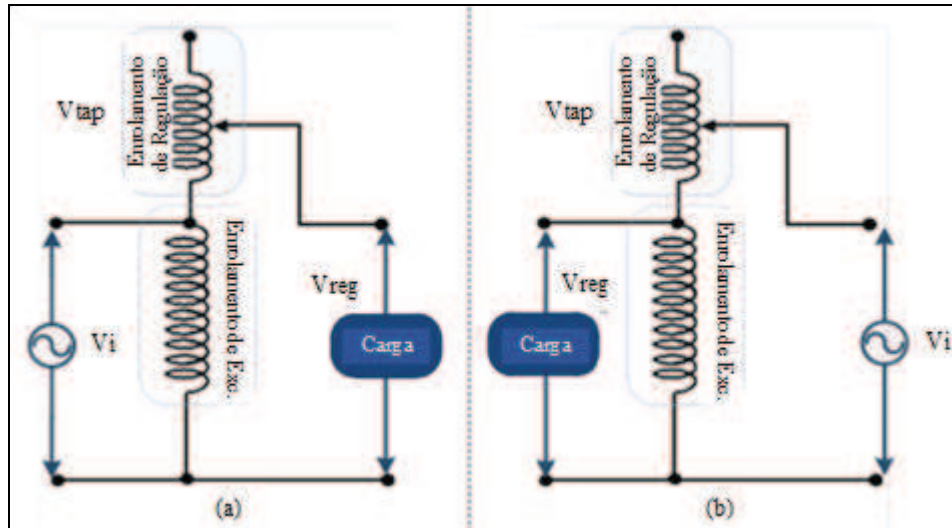
Segundo Larsson et al. (1997), a adoção de Reguladores de Tensão com Comutador Eletrônico de TAP permite que seja obtida uma regulação de tensão mesmo diante de VTCDs (Variação Transitória de Curta Duração). De tal modo, obtém-se uma regulação de tensão em uma faixa mais ampla, além de uma tensão de melhor qualidade. Isto é possível pelo fato de o comutador, baseado em semicondutores de potência, permitir uma mudança de TAP de forma direta. Assim, não é necessário passar os TAPs de forma sequencial, como ocorre no comutador eletromecânico (FAIZ et al, 2006). Portanto, o comutador eletrônico proporcionará a variação direta entre os diferentes TAPs. A dinâmica superior, no que respeita ao tempo necessário a uma troca de TAPS, é uma das principais vantagens do RT com comutador eletrônico.

Tanto os reguladores de tensão com comutadores eletrônicos de TAPs como os que utilizam comutadores mecânicos, apresentam duas formas distintas de operação, classificadas como Tipo A ou Tipo B. Além disso, conforme muda o sentido do fluxo de potência no alimentador, pode existir uma alternância desses modos de operação (ABNT, 1992).

- **Tipo A:** excitação variável, ocorre quando o enrolamento de excitação (ou principal) está em paralelo com a fonte de alimentação, fazendo com que seja submetido diretamente às variações de tensão da fonte, apresentando um comportamento não linear, em que a parcela de compensação é sensível à tensão de entrada.
- **Tipo B:** excitação fixa, ocorre quando o enrolamento de excitação é localizado do lado da carga, de forma que seja submetido à tensão regulada. Por sua vez, apresenta um comportamento linear e insusceptível a variações na tensão de entrada (desde que estas estejam dentro dos limites operacionais do RT).

A Figura 4 ilustra o diagrama esquemático simplificado de um Regulador de Tensão do Tipo A e B. Dependendo da tecnologia utilizada, o tempo de comutação de TAP varia. De acordo com Spatti (2011) em algumas subestações, o tempo de operação de comutação pode ser da ordem de minutos. Comutadores mecânicos e eletromecânicos requerem que a comutação excursions todos os TAPs necessários, de modo que o tempo de mudança de comutação é por degrau e proporcional ao número de posições atravessados.

Figura 4 Diagrama esquemático de reguladores de tensão do tipo A (a) e do tipo B (b).

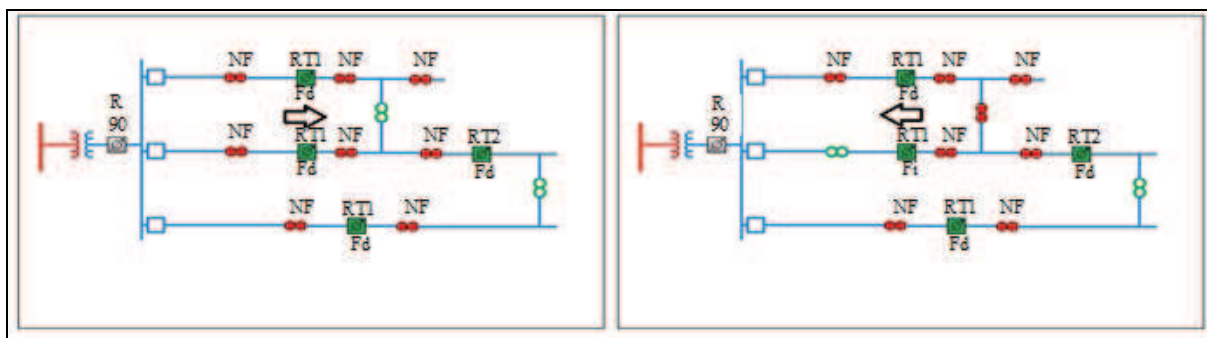


Fonte: Adaptado de Dos Reis (2013).

Segundo Aredes et al. (2015) comutadores eletrônicos com tiristores tem a vantagem de atingir o TAP final de forma direta com redução de tempo de resposta. Além disso, o comutador eletrônico se caracteriza por apresentar uma dinâmica de comutação de meio ciclo de onda, equivalente a 8 ms, muito inferior à dinâmica mecânica de um comutador convencional. De acordo com simulações realizadas no trabalho de Dos Reis (2013), o tempo de mudança de TAP para comutadores eletrônicos é de aproximadamente 300 ms. Esse é o tempo mínimo de segurança necessário para garantir que as chaves do TAP anterior interrompam a condução e os tiristores disparem para acionar o TAP final. Durante este curto período de transição, a tensão é cortada. Ainda no mesmo trabalho, o autor conclui que os comutadores de TAP eletrônico são mais rápidos do que os eletromecânicos e mecânicos que operam em geral em tempos na ordem de 2 s. No entanto, existem reguladores operando com comutadores rápidos, como o *Quick-Drive TAP-Changer* desenvolvido pela Cooper Power, com tempo de comutação na ordem de 250 ms.

Normalmente, os reguladores de tensão são dimensionados para trabalhar com o fluxo de carga em um sentido. Porém, situações de contingências e mudanças entre os alimentadores podem mudar o sentido do fluxo de potências, ocasionando a operação em fluxo inverso. A Figura 5 apresenta um regulador de tensão trabalhando nas duas condições.

Figura 5 Fluxo de potência normal e inverso em um regulador de tensão.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Desta forma, há reguladores preparados e não preparados para trabalhar desta forma. Os reguladores que não possuem esse recurso precisam ser isolados em caso de uma contingência que altere o sentido de fluxo, representando uma fraqueza de controle do sistema nesses casos. Para contornar esses problemas, o trabalho de Araújo et al. (2007) apresentou alternativas para medir a tensão na entrada do regulador usando um TP e um divisor de tensão com capacidade de reconhecer a inversão de alimentação do regulador. Depois disso, o sistema muda a polaridade do motor de comutação e altera o monitoramento do TP do lado da carga pelo monitoramento do TP do lado da fonte. O sistema proposto nesse trabalho pode ser uma alternativa viável para reguladores de tensão de fluxo unilateral.

De acordo com o módulo 8 do Prodist (2009), as faixas de fornecimento consideradas adequadas, precárias e críticas para tensões entre 1kV e 69kV estão presentes no Quadro 2.

Quadro 2 Faixa de atendimento de tensão em regime permanente segundo o PRODIST.

Tensão de atendimento (TA)	Faixa de variação de leitura (TL) em relação à tensão de referência (TR)
Adequada	$0,93 TR \leq TL \leq 1,05 TR$
Precária	$0,90 TR \leq TL \leq 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: ANEEL (2017).

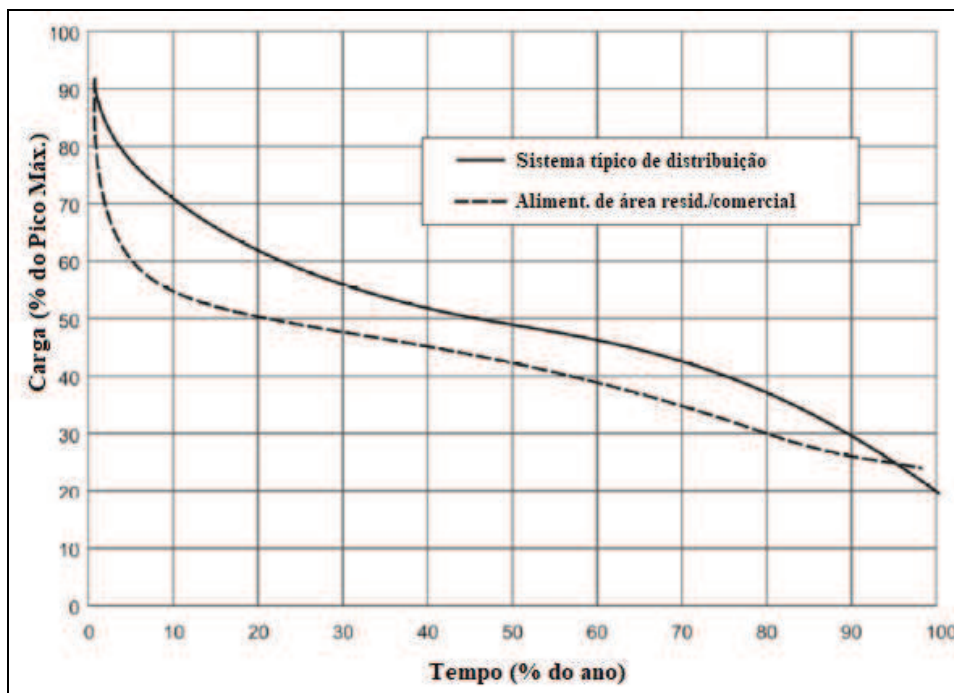
Segundo a Aneel (2001), a faixa de tensão denominada Precária se encontra entre 0,9 e 0,93 p.u. É importante salientar que, para o fornecimento em média e alta tensão, não há uma faixa de tensão Precária acima da tensão Adequada. A duração de transgressão de tensão Precária (DRP) não pode ultrapassar 3% do tempo de medição. O mesmo acontece para a duração de transgressão de tensão Crítica (DRC), tanto para níveis superiores a 1,05 p.u como para inferiores a 0,9 p.u, cujo índice foi estabelecido em 0,5%.

De acordo com Dugan et al. (2003), níveis de tensão entre 0,93 p.u. e 1,05 p.u são considerados adequados para fornecimento de energia elétrica. Portanto, os sistemas de distribuição devem ter como objetivo fornecer energia dentro desta faixa, a fim de evitar

transgressões. Valores de tensão acima de 1,05 p.u. se enquadram na faixa de tensão denominada Crítica. A entrega de energia nesta faixa pode também danificar os equipamentos dos consumidores. Se o tempo de fornecimento nesta faixa for superior a 1 minuto, pode-se então caracterizar uma sobretensão nos consumidores. Abaixo de 0,93 p.u. considera-se situações de subtensões.

Quando ocorre um aumento da carga em um sistema de distribuição, eventualmente chega-se a um ponto onde a carga ultrapassa a capacidade de um ou mais componentes do sistema. Essas situações acarretam em um maior risco de discontinuidades e perda de qualidade no fornecimento de energia elétrica. Para se avaliar esta condição de sobrecarga, pode-se usar uma curva de potência normalizada, como na Figura 6. Essa análise permite uma análise da duração percentual dos diferentes níveis de carregamento.

Figura 6 Curva de duração da carga.



Fonte: Adaptado de Public Utility Commission of Texas (2001).

Apesar dos picos extremos não serem eventos frequentes, o sistema de transmissão e distribuição é projetado especificamente para atender a estes picos. Deste modo, o aumento do carregamento de pico determina quando serão necessárias ações para prevenir sobrecarga.

Por um lado, a solução tradicional do problema é de aumentar a potência instalada do sistema ou substituir equipamentos subdimensionados, como por exemplo, transformadores, cabos elétricos, proteções, entre outros. Por outro lado, soluções assim, muitas vezes podem ser inviáveis devido ao elevado custo de investimento.

Com estes desafios Hsu e Yi (1993) abordaram a reconfiguração de redes de distribuição sob a ótica do planejamento, tendo como objetivo a redistribuição de carga entre alimentadores (eliminando de sobrecargas). Além disso, trabalharam para garantir que o

sistema de proteção continue operando adequadamente mesmo depois da reconfiguração da rede.

Cherkaoui et al. (1993) publicou um trabalho que utiliza métodos heurísticos para obter uma reconfiguração ótima de redes de distribuição. O artigo fornece um panorama adequado das diversas abordagens para operação de chaves. Sendo elas, destrutiva, construtiva e troca de ligações. Na destrutiva, as chaves estão inicialmente todas fechadas e vão sendo abertas uma a uma. A construtiva funciona de maneira oposta a destrutiva. Nos dois primeiros casos a radialidade é imposta através da condição de que o número de ligações condutoras seja igual ao número de nós de carga.

Diversos autores abordaram a reconfiguração de redes seja para operação normal ou contingência. Dentre de todo o desenvolvimento desses temas, cabe ressaltar os trabalhos desenvolvidos por Bernardon (2007), Pfitscher (2013) e Mello (2014), quando abordaram que o problema de melhoria do desempenho da rede se estabelece por meio de objetivos que podem ser reduzir perdas ou melhorar níveis de tensão. Nessa abordagem se avalia qual a configuração de rede produz o melhor resultado, sem violar as restrições de operação adequada e segura do sistema de distribuição.

Nestes trabalhos, utilizam-se critérios de busca heurística onde o algoritmo procura uma nova solução em iterações a partir de configurações vizinhas. Essa técnica pode ser melhor entendida em duas etapas:

- Etapa A: análise das interligações entre alimentadores nas situações onde não há geradores distribuídos conectados na RD;
- Etapa B: análise das interligações nas situações onde há conexão de geradores distribuídos na RD.

2.6 Supervisão e controle de reguladores de tensão (Protocolo DNP3)

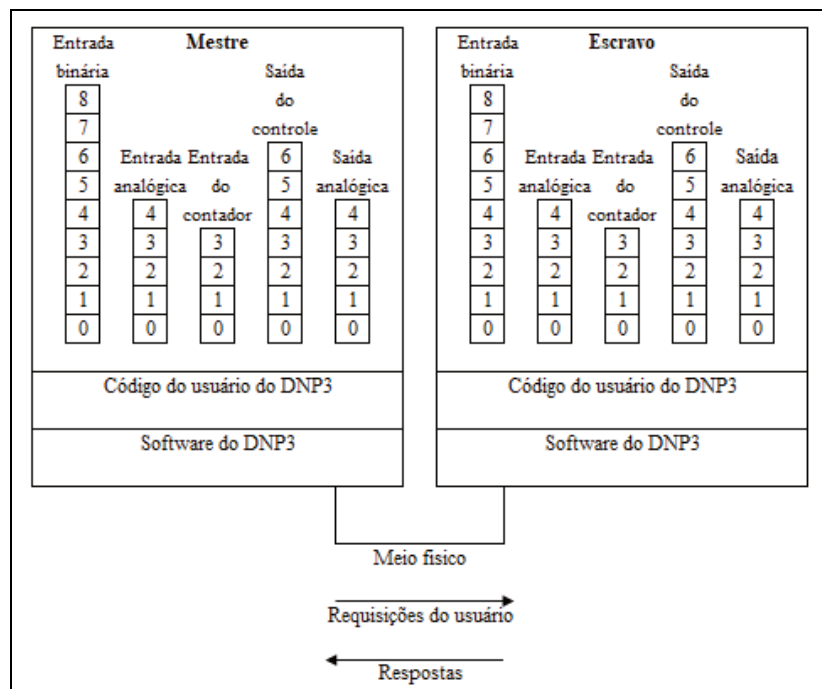
Segundo Boufafs et al. (2012) a geração distribuída junto com a infraestrutura de medição avançada irá gerar bilhões de pontos de dados de milhares de dispositivos do sistema de centenas de milhares de clientes. Os dados coletados a partir de medidores inteligentes, de eletrodomésticos, de subestações, e outras fontes serão de uma quantidade enorme. Esses dados gerados por aplicações e dispositivos de controle deverão ser transportados de forma eficiente para a concessionária e para centros de controle. Para isso, é necessário que a infraestrutura de comunicação seja robusta, com uma largura de banda suficiente para lidar com uma grande quantidade de dados que precisarão ser constantemente trocados. No entanto, as redes de comunicação utilizadas atualmente em redes elétricas foram projetadas para sistemas de controle tradicionais, que trabalham com uma quantidade limitada de dados. Portanto, podem não satisfazer as exigências das aplicações e operações de controle para as redes elétricas inteligentes. A infraestrutura de comunicação do sistema legado segue uma infraestrutura de comunicação centralizada como solução para supervisão e controle de sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Esses sistemas utilizam o SCADA para monitorar e supervisionar as variáveis e os dispositivos das subestações de energia. Esses sistemas legados são compostos por dispositivos de controle intitulados Unidades Terminais Remotas (UTR). Nessa arquitetura, a comunicação é feita em um modelo mestre-escravo podendo existir várias UTRs escravas por mestre, normalmente localizadas

em campo. Exemplos de protocolos usados pelas UTRs são o Modbus (2012) e DNP3 (DNP 2010, DNP, 2012).

O DNP 3 trata-se de um protocolo não proprietário, disponível para qualquer pessoa somente acessando o sítio. Somente uma taxa nominal é cobrada pela documentação, mas disponibilizada no mundo inteiro sem restrições. Isso significa que as distribuidoras podem comprar as estações mestres e os equipamentos de qualquer fabricante e se certificarem que eles terão confiabilidade de comunicação (CURTIS, 2005).

A Figura 7 apresenta a relação entre a estação mestre-escravo de uma forma simplificada com os dados e processos envolvidos. O mestre está na esquerda e o escravo na direita. Uma série de blocos no topo dos equipamentos escravos descreve os dados armazenados no banco de dados e nas saídas dos equipamentos. Os mais variados tipos de dados são armazenados como matrizes. As matrizes binárias representam estados físicos ou lógicos dos equipamentos. Valores de entrada analógicos da matriz representam as quantidades medidas ou armazenadas nos escravos. Os vetores dos contadores representam os valores contados, como consumo horário que estão sendo aumentados e depois retornam a um estado inicial ou zero. As saídas de controle são organizadas dentro de uma matriz representada estado físico ou lógico (liga ou desliga), aumenta-diminui e condição de trip. Por fim, os vetores das saídas analógicas representam as saídas físicas ou quantidades analógicas como as usadas para setpoints.

Figura 7: Relação de mestre e escravo no protocolo DNP 3.



Fonte: Adaptado de Curtis (2005).

Os elementos das matrizes são marcados de zero até $N - 1$ onde N é o número de blocos apresentado para o tipo de dado usado. Na terminologia DNP3, o número dos

elementos é chamado de indexadores de ponto. Os indexadores são baseados em zeros em DNP3, o que define que o elemento mais baixo é identificado como zero.

O mestre do DNP3 também tem um banco de dados similar para as entradas (binárias, analógicas e de contagem). O mestre usa os valores do banco de dados para propósitos específicos de mostrar o status dos sistemas, controles em malha fechada, notificações de alarme, entre outros. Um dos objetivos do mestre é de manter o banco de dados atualizado. Ele realiza essa tarefa enviando solicitações para as estações pedindo para retornar os valores do banco de dados das estações. Isto é denominado *polling*. As estações respondem a solicitação transmitindo os valores do banco de dados. As estruturas apresentadas na Figura 7 mostram os sentidos das solicitações (mestre para escravo) e das respostas (escravo para mestre). Em alguns casos também os escravos podem enviar respostas sem haver solicitações do mestre.

2.6.1 Camadas do DNP3

O mestre e o escravo (estações) mostrados na Figura 2 possuem programas em duas camadas. A camada superior é a camada do usuário do DNP3. No caso do mestre, trata-se do programa que interage com o banco de dados e inicia as solicitações de dados para o escravo. No caso do escravo, é o programa que busca os dados solicitados do seu banco de dados respondendo a solicitação do mestre. Se não houver separação física entre o mestre e a estação, o DNP3 pode ser eliminado através da conexão direta entre as suas camadas superiores.

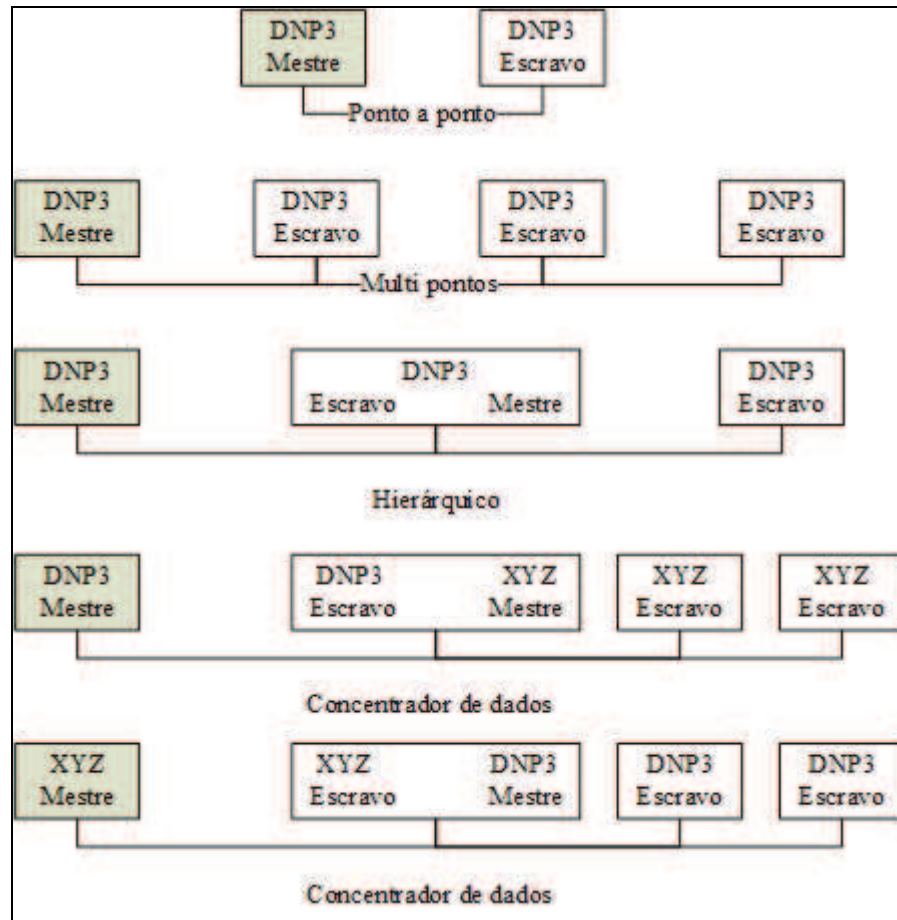
Entretanto, como a distância física, ou outro tipo de separação entre o mestre e a estação existe, o programa do DNP3 é colocado em uma camada inferior. O código do usuário do DNP3 usa o programa do DNP3 para transmitir as solicitações ou respostas para ser compatível com o código do usuário do DNP3 na outra ponta.

2.6.2 Arquiteturas

A Figura 8 apresenta arquiteturas comuns usadas para DNP3. Na parte superior, está apresentada uma comunicação ponto-a-ponto, com um mestre e um escravo. A conexão física entre eles normalmente é dedicada ou discada através de uma linha telefônica.

O segundo tipo é conhecido como projeto *multi-drop*. Uma estação mestre comunica com diversos equipamentos. A comunicação normalmente ocorre entre o mestre e os escravos por vez. O mestre solicita os dados para a primeira estação, depois move-se para a próxima estação e continua com as solicitações de forma ordenada. A conexão é uma linha telefônica *multi-drop*, fibra óptica ou rádio. Cada escravo pode receber mensagens do mestre e somente tem permissão para responder as mensagens para o mestre. Em algumas formas *multi-drop*, a comunicação pode ser de par a par. Uma estação pode operar como mestre, recolhendo as informações ou enviando comandos para as estações escravo de outra estação. Além disso, pode mudar de papel para virar a mestre de outra estação.

Figura 8: Relação de mestre e escravo com critério hierárquico no protocolo DNP 3.



Fonte: Adaptado de Curtis (2005).

A terceira topologia apresentada na Figura 8 mostra um sistema do tipo hierárquico onde o equipamento no meio é um escravo do mestre a esquerda e é um mestre com respeito a estação a direita. O equipamento do meio é chamado usualmente de sub-mestre.

As duas últimas topologias da Figura 8 mostram aplicações de concentradores de dados e conversores de protocolos. Um equipamento deve recolher as informações de múltiplas estações no lado direito da figura e armazenar os dados no banco de dados aonde podem ser acessados por uma estação mestre no lado esquerdo da figura. Essa concepção é normalmente vista em subestações aonde os concentradores de dados coletam informações de equipamentos inteligentes para transmitir para a estação mestre.

Os sistemas supervisórios utilizam protocolos de comunicação específicos, tais como o DNP3, para atender as necessidades de monitoramento, comunicação entre dispositivos e operação de processos. Os supervisórios chamados de SCADA, incluem funções de monitoramento de variáveis analógicas, digitais de entrada e saída dos processos, com armazenagem dos valores possibilitando análises gráficas (CAMPBELL, 1988). Esses sistemas ainda permitem a implementação de lógicas de controle de diferentes dispositivos alocados ao longo de um processo específico. Segundo Moraes (2007), esses sistemas podem usar dois tipos de comunicação, por consulta ou interrupção. No caso da comunicação por

consulta, a relação mestre e escravo entre dispositivos resulta no controle total da comunicação por parte do sistema supervisor central em relação aos dispositivos remotos. Assim, a leitura nas unidades remotas é realizada através de solicitações do mestre de acordo com a sequência lógica programada no sistema. Essa comunicação possui a vantagem de ter implementação simples, garantia dos tempos de respostas e facilidade na detecção de falhas.

No caso da comunicação por interrupção, as unidades remotas monitoram os valores de suas variáveis e quando essas ultrapassam o limite estabelecido, ocorre a comunicação com a central. A vantagem dessa abordagem reside na comunicação rápida de eventos críticos para a funcionalidade do sistema.

2.7 Sistemas Embarcados

Com o objetivo de desenvolver um controle inteligente para reguladores de tensão é necessário revisar as tecnologias de microcontroladores e microprocessadores disponíveis no mercado. Com isso, é possível escolher uma arquitetura que disponha dos requisitos técnicos necessários para a aplicação.

2.7.1 Microcontroladores e microprocessadores

Um microcontrolador pode efetuar funções que necessitariam de um grande número de outros componentes trabalhando de forma coordenada e em conjunto. Para suprir exigências de projetos, existe uma ampla gama de microcontroladores disponíveis no mercado. Os microcontroladores são divididos em categorias de acordo com a sua memória, arquitetura, instruções e outros parâmetros. Os principais tipos de microcontroladores podem ser resumidos na lista abaixo (ELECTRONICSHUB, 2017):

- Microcontroladores 8051;
- Microcontroladores PIC;
- Microcontroladores AVR;
- Microcontroladores ARM.

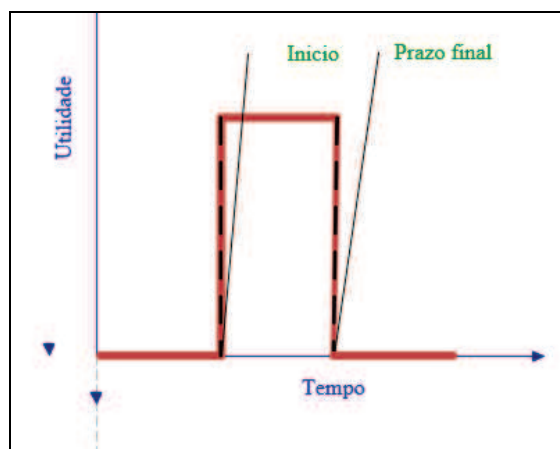
Outras aplicações, às vezes mais complexas, requerem o uso de microprocessadores, como a Raspberry Pi. O conceito dessa placa foi desenvolvido inicialmente em 2006 com o lançamento oficial em meados de 2012. Versões mais modernas e potentes da placa foram lançadas ao passo em que a procura por essa tecnologia se tornou maior. Um exemplo de um modelo dessa placa é a Raspberry Pi 3, que utiliza um processador ARM, possui 512 MB de memória RAM, suporte para 4 portas USB, cartão de memória DSI e saída para vídeo HDMI. De acordo com Sachdeva e Katchii (2014), esse dispositivo pode operar com os sistemas operacionais Raspbian, Pidora, Openelec, LINUX, entre outros, todos com licença grátis. Além disso, ela fornece suporte para programação nas linguagens de Python, Java, C, C++, Perl e Ruby. Essa versatilidade é importante, pois é possível escolher entre uma linguagem de alto ou médio nível. Isso permite escolher entre a facilidade de implementações ou buscar maior desempenho eliminando camadas de códigos desnecessárias. Essas características facilitam o uso desta placa para o desenvolvimento de aplicações de engenharia inovadoras e provas de conceito, pois é uma solução flexível, de relativo baixo custo e compacta.

2.8 Sistemas em Tempo Real

A característica inerente de sistemas de tempo real é que suas funções devem ser realizadas dentro de um prazo máximo. Segundo Burns e Mckay (1991), os sistemas de tempo real podem ser classificados em: Crítico, Não crítico e Misto.

Sistemas de tempo real do tipo crítico são aqueles que possuem prazos cruciais a serem respeitados. A Figura 9 apresenta um sistema de tempo real. O tempo necessário para completar o evento é mapeado contra a utilidade que este evento tem para o sistema. A utilidade pode ser descrita como a contribuição do evento frente aos objetivos do sistema. Em síntese, a utilidade só tem valor caso seja executada entre o tempo inicial e o prazo máximo.

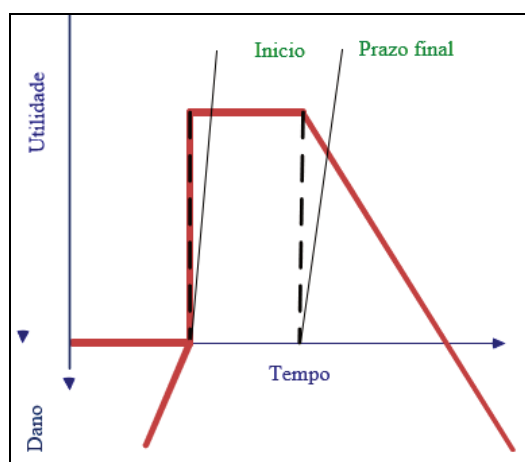
Figura 9 Sistema de tempo real crítico.



Fonte: Adaptado de Burns (1991).

Em aplicações que envolvam segurança, a situação pode ser pior, pois a execução da tarefa fora do prazo pode repercutir em danos para o sistema, como pode ser observado na Figura 10. Funções de proteção de sistemas elétricos podem ser assim caracterizadas. Isso se deve ao fato de que tempo de resposta está diretamente relacionado com a exposição do sistema às elevadas correntes de curto-circuito.

Figura 10 Sistema de tempo real com geração de dano ao processo.

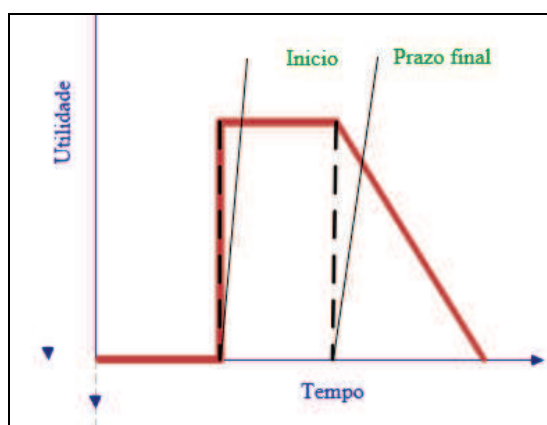


Fonte: Adaptado de Burns (1991).

De forma direta, o dano gerado pela execução fora do prazo determinado pode gerar danos com magnitudes muito superiores aos próprios objetivos do sistema. O não atendimento a esses prazos pode acarretar em falhas com danos incrementados com o tempo podendo atingir níveis catastróficos.

Esses sistemas são necessários em uma vasta gama de aplicações, incluindo controle de tráfego aéreo, controle de processos e indústria espacial. Na maior parte dos sistemas de tempo real os eventos não serão críticos. Algumas aplicações permitirão que alguns ciclos de tempo sejam perdidos sem que a integridade do sistema seja comprometida. Esses sistemas são chamados de sistemas de tempo real do tipo não crítico. A Figura 11 apresenta um sistema de tempo real com essa característica (BURNS; MCKAY, 1989).

Figura 11 Sistema de tempo real do tipo não crítico.



Fonte: Adaptado de Burns (1991).

No entanto, em termos práticos muitos sistemas apresentam comportamento híbrido se comportando como não crítica e dependendo da circunstância como crítica. Sistema onde alguns prazos perdidos não causam falha total, mas se em grande número podem prejudicar o sistema. A operação é descartada se não cumprida no prazo especificado. Esses sistemas são chamados de mistos.

2.8.1 Características do prazo máximo

A partir do pressuposto que um sistema de tempo real necessita executar as suas tarefas dentro de um prazo estabelecido, os sistemas ainda podem se caracterizar por serem periódicos ou aperiódicos. Os processos periódicos executam as suas tarefas em uma base de tempo regular e são caracterizados por ter um período definido. O prazo coincide com o final do período garantindo a execução dentro do prazo e dentro do período estabelecido. Nestes processos, a execução deve ser dada como as medidas das médias ou no pior caso pelo tempo de cada execução (BURNS; MCKAY, 1989).

Ainda neste trabalho, o autor declara que no caso dos processos aperiódicos, a ativação do processo é realizada por um evento externo. Esses processos também possuem tempos

limites associados, ou seja, eles devem completar toda a tarefa dentro de um período pré-definido. É comum que esses processos trabalhem com eventos críticos com prazos particularmente importantes. Em geral, processos aperiódicos são vistos como atividades randômicas, seguidos de uma distribuição de Poisson, por exemplo. Essa distribuição permite chegadas de eventos massivas e simultâneas, mas não impede a concentração de atividades aperiódicas. Portanto, não é possível de fazer uma análise de pior cenário (há uma possibilidade finita do número de eventos aperiódicos). Como um resultado disso, processos aperiódicos não podem ter prazos rígidos. Para permitir o cálculo de pior cenário, um período mínimo entre dois eventos aperiódicos (da mesma fonte) deve ser estipulado. Se esse for o caso, esse processo pode ser chamado de esporádico.

2.8.2 Programação sequencial e concorrente

Para atender a todas as tarefas solicitadas dentro das suas respectivas restrições de tempo, os sistemas de tempo real necessitam invariavelmente de algum mecanismo de gerência de atividades. Esse mecanismo as classifica (ordenamento) segundo algum critério de prioridade de atendimento.

A programação sequencial possui a característica de produzir o mesmo resultado para o mesmo conjunto de dados de entrada. Esta forma de programação possui algumas limitações que não possibilitam o atendimento de sistemas de tempo real. Por exemplo, há a necessidade de haver interrupção de uma tarefa devido à solicitação de atendimento de outra de mais alta prioridade. Também, pode haver a presença usual de periféricos de baixa velocidade, quando comparados à velocidade de execução das instruções pelo processador.

A programação concorrente é um tipo particular de programação que processa várias atividades de forma paralela e tem por objetivo utilizar mais efetivamente os recursos materiais disponíveis. Deste modo visa atender às restrições temporais especificadas para as diversas atividades solicitadas ao sistema de tempo real. A programação concorrente possibilita que várias atividades, que constituem o programa, sejam executadas sobrepostas no tempo. A programação concorrente é composta de vários programas sequenciais sendo executados de forma concorrente.

A programação concorrente possui os seguintes elementos para ser implementada:

- **Tarefas:** são divididas em “pedaços” (com uma fração do prazo) para facilitar na priorização de threads;
- **Sincronismo:** há diversas formas de realizar o escalonamento podendo ser orientado a eventos, a fatias de tempo e misto;
- **Troca de informação:** comunicação por memória compartilhada e comunicação via troca de mensagens. Podem ser usados mutexes, semáforos e mensagens.

2.9 Confiabilidade, integridade e segurança funcional

A segurança funcional na área de controle e automação de máquinas e processos é determinada por uma regulamentação rígida principalmente porque falhas podem provocar danos irreversíveis a pessoas e ao meio ambiente (DUNN,2003). A norma IEC 61508, publicada inicialmente no ano 2000 estabelece técnicas e medidas para evitar e controlar

falhas aleatórias dos componentes da máquina e erros de projeto. Essa norma também é usada por muitas comissões técnicas do IEC na preparação dos seus próprios padrões para especificação dos produtos ou de sistemas de segurança. Destacam-se alguns exemplos, tais como indústrias em geral, setor nuclear e sistemas de acionamento de energia (BELL, 2011).

Um sistema instrumentado de segurança desenvolvido criteriosamente segundo a norma pode almejar certificação para um determinado nível de integridade de segurança, SIL (*Safety Integrity Level*), com valores discretos entre 1 e 4. O SIL é o parâmetro de projeto chave que especifica a medida de redução de risco que um equipamento de segurança requer para alcançar uma função particular.

Sistemas com menor probabilidade de apresentar defeitos residuais da função de segurança são classificados em SIL 4 (10^{-9} defeitos perigosos por hora ou 10^{-5} defeitos sob demanda em baixa demanda de operação). Aumentando uma ordem de grandeza na taxa de defeitos, diminui de uma unidade o valor do SIL, até SIL 1. A probabilidade de falha na demanda é a indisponibilidade do sistema. É a fração de tempo em que o sistema está indisponível para executar sua função de segurança, quando a planta está operando.

2.10 Considerações finais do capítulo

Nesse capítulo foram apresentados os principais conceitos necessários para o desenvolvimento do trabalho. Em síntese, foram abordados os conceitos de controle de tensão em reguladores de tensão contextualizados nas redes elétricas inteligentes. A abordagem específica desses temas aponta para o desenvolvimento de um controle local que calcula os parâmetros de ajuste dos reguladores de tensão em um nível local respeitando a hierarquia do controle centralizado. Apresentou também uma breve revisão sobre operações em tempo real e plataformas de desenvolvimento do protótipo.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

O controle de tensão de redes de distribuição é um tema largamente estudado nos últimos anos com foco principalmente em redução das perdas elétricas, melhoria da qualidade da energia fornecida e aumento da confiabilidade. No que tange geração, a construção de uma usina elétrica de grande porte normalmente é intensiva em capital, podendo gerar atrasos nas correções dos problemas de controle de tensão. Com o objetivo de melhorar o controle desses parâmetros, as redes de distribuição contam cada vez mais com equipamentos de controle de tensão distribuídos ao longo de sua extensão. Sendo assim, o propósito de buscar melhorias nas condições de operação do sistema é uma tarefa importante e ao mesmo tempo complexa. Para tanto é necessário determinar os ajustes e posições de reguladores de tensão, potências de bancos de capacitores, posições de TAPs de transformadores e participação de geradores distribuídos. Essa configuração é realizada levando em consideração as curvas de carga diárias dos consumidores, restrições operacionais e limites técnicos dos dispositivos.

A definição dos TAPs dos transformadores não é considerada como uma atribuição do controle local dos reguladores de tensão. Contudo é uma restrição para a aplicação dos seus ajustes, devido ao risco de fornecer níveis de tensão inadequados aos consumidores atendidos em tensão secundária. Desse modo, a informação sobre quais zonas de TAP serão atendidas pelo regulador de tensão será obtida através do sistema centralizado ou de forma manual, sendo caracterizada como um parâmetro de entrada do controlador local.

A geração distribuída também pode atuar no controle de tensão. Os inversores utilizados na geração também têm sido sugeridos como um meio de proporcionar a potência reativa e o consumo necessário para a manutenção de regulação de tensão. Portanto, podem servir como uma alternativa adicional para a implementação de controle com menor investimento e maior atratividade econômica (TURITSYN ET AL. , 2011).

Além disso, dada a evolução dos sistemas de controle e automação industrial, o foco passou a ser em modelos de controle coordenados, hierarquizados e centralizados. Como sugere Pereira (2014), é possível a otimizar o uso destes equipamentos de forma holística, avaliando o impacto de um equipamento em outro. Estes sistemas atuam de forma paralela aos controles locais de forma inteligente provendo uma sinergia entre o processamento e análise de dados dos sistemas locais e centralizados. Segundo Mello et al. (2016), o problema de controle de tensão e potência reativa em redes de distribuição consiste em buscar uma estratégia de forma coordenada para operação dos equipamentos de controle existentes no sistema.

Com base nas informações coletadas nos reguladores de tensão e uso de protocolo de comunicação DNP3, Pereira (2014) propôs a criação de curvas dinâmicas de carga e tensão com base nas zonas de regulação de cada regulador de tensão. Essas curvas são utilizadas para realizar o auto-ajuste dos parâmetros dos reguladores de tensão em nível local, sempre que os resultados em campo se distanciarem da curva de referência. Em seu trabalho, a tensão de referência e as compensações de queda de linha (U_R e U_X) são geradas usando regras heurísticas. A faixa de insensibilidade (Ins) é gerada com uso de lógica fuzzy.

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

Utilizando-se da porta de comunicação do regulador, o controle local (CL) acessa os registros de tensão de entrada e saída, carregamento (P, Q e I) e posição de TAP utilizando o protocolo de comunicação presente nos reguladores. A partir de então, é gerada a curva de carga e de tensão para o regulador verificando as condições de regulação do equipamento. Uma vez calculados os ajustes, estes são enviados para o regulador de tensão que passa a considerá-los na sua operação.

Ainda no mesmo trabalho o autor propõe que os valores das curvas de carga armazenados nos reguladores sejam constantemente monitorados e comparados com a curva utilizada para o cálculo dos ajustes. Assim, quando os níveis de carga ou tensão se afastam da curva de referência, considera-se um novo cenário indicando a necessidade de adequação dos ajustes. Uma vez identificada essa necessidade, são recalculados os parâmetros de tensão de referência (U_{REF}), compensação de queda de tensão na linha (U_R e U_X) e insensibilidade (Ins). Para os últimos parâmetros o autor, utilizou um método heurístico para determinar os valores de U_R e U_X e uma lógica fuzzy para o calcular a insensibilidade (Ins).

A parcela adaptativa de cada regulador de tensão baseia-se na definição dos ajustes desses equipamentos. Os ajustes se baseiam na definição da tensão de referência (U_{REF}), compensação de queda de tensão na linha (U_R e U_X), faixa de insensibilidade (Ins) e temporização (t_i). Esses parâmetros estão associados a intervenção em tempo real na operação dos reguladores através de um controle centralizado. O controle centralizado é ativado a partir de gatilhos relacionados a operação e monitoramento de diversos equipamentos da rede de distribuição. Esses equipamentos incluem os reguladores de tensão, religadores e chaves com operação remota, através do sistema supervisorio, além dos dispositivos específicos para o controle de tensão.

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

$$U_R = \left[\frac{(U_{PMAX} - U_{PMIN})}{RTP} \cdot \frac{I_c}{I_{PMAX}} \right] \cdot \cos(\varphi_{PMAX}) \quad (1)$$

$$U_X = \left[\frac{(U_{PMAX} - U_{PMIN})}{RTP} \cdot \frac{I_c}{I_{PMAX}} \right] \cdot \text{sen}(\varphi_{PMAX}) \quad (2)$$

$$U_{REF} = \frac{U_{PMAX} - \left[\frac{I_{PMAX} \cdot (U_R \cdot \cos(\varphi_{MAX}) + U_X \cdot \text{sen}(\varphi_{MAX}))}{I_C} \right]}{RTP} \quad (3)$$

Onde: U_{REF} : tensão de referência (V);

U_R : compensação resistiva (V);

U_X : compensação capacitiva (V);

I_L : corrente de carga (A);

I_C : corrente nominal do controle (A);

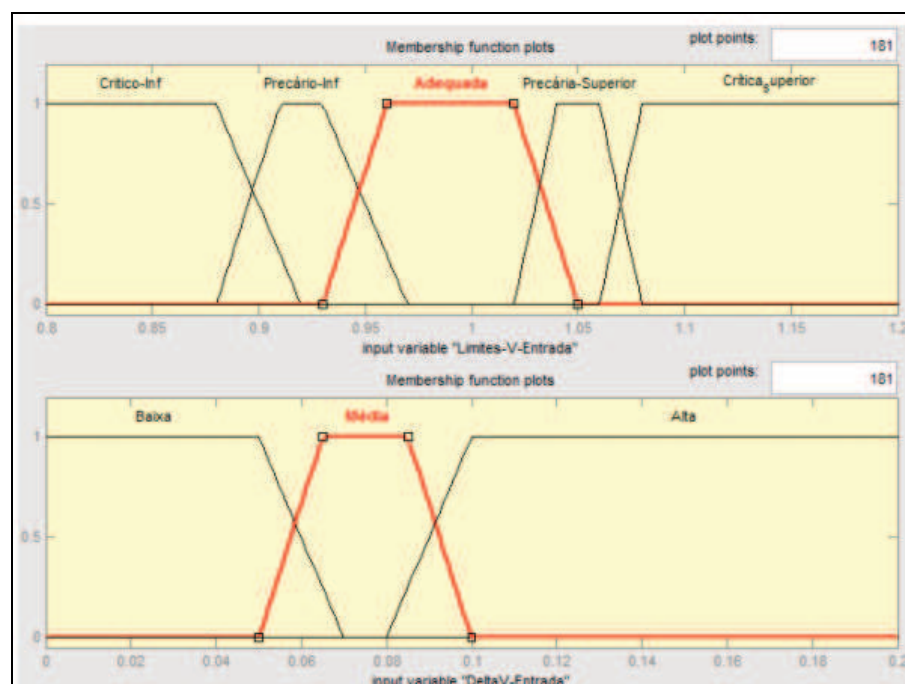
U_{PMAX} : tensão desejada no patamar de carga máxima (V);

$U_{SAÍDA}$: tensão desejada no patamar de carga leve (V);

I_{PMAX} : corrente no patamar de carga máximo (I);

Para o cálculo da insensibilidade (Ins) o autor empregou a lógica fuzzy, considerando os limites regulatórios e a análise da variação da tensão de entrada, como mostra a Figura 12.

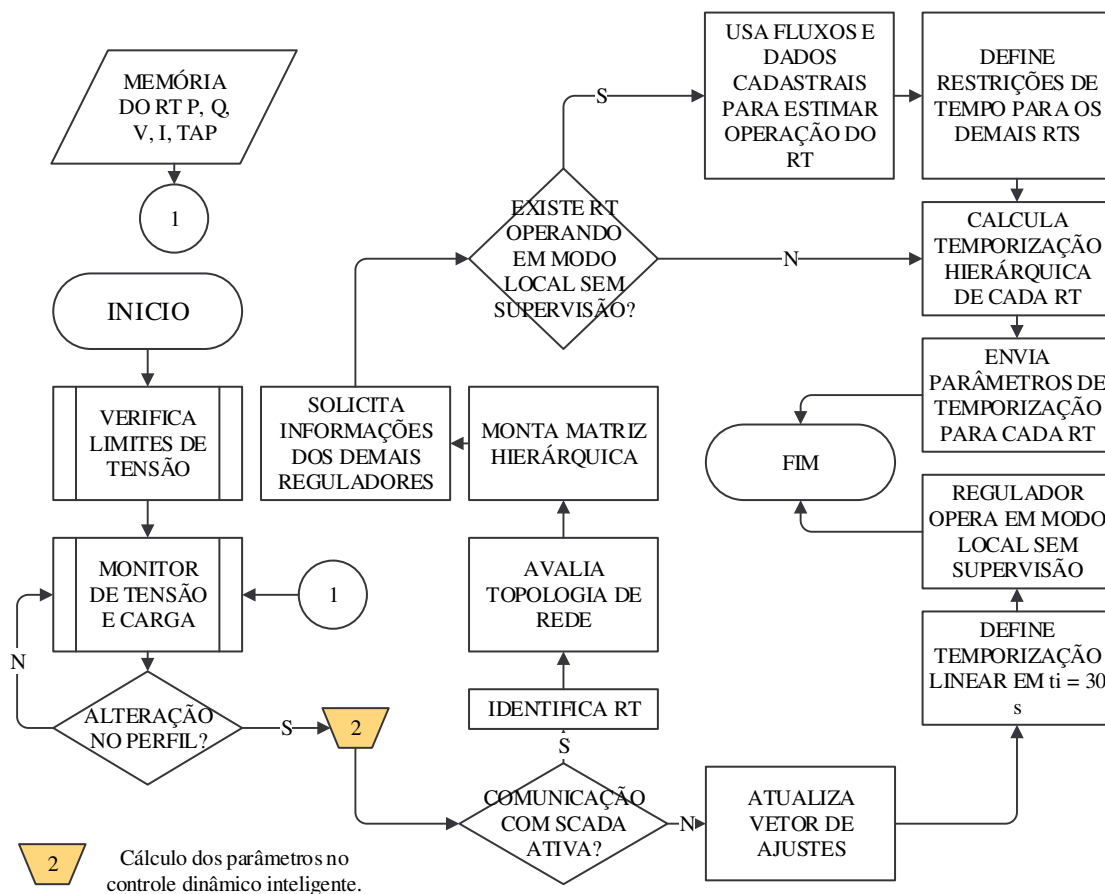
Figura 12: Variáveis de entrada do controlador.



Fonte: Adaptado de Pereira (2014).

Esse controle local é associado ao controle supervisório que faz o monitoramento dos reguladores de tensão, religadores e chaves com operação remota, podendo ativar a operação do controle centralizado. O controle hierárquico visa otimizar a operação dos reguladores de uma mesma rede, limitando as posições de TAP antecipando a operação de cada regulador. Dessa forma, é possível adequar de forma mais rápida os níveis de tensão e eliminar operações desnecessárias dos reguladores quando esses equipamentos estiverem operando em cascata. A Figura 13 apresenta a sistemática do controle hierárquico e adaptativo de tensão.

Figura 13 Controle de tensão hierárquico adaptativo.



Fonte: Adaptado de Pereira (2014).

Ainda na Figura 13 destaca-se o ponto 2 referente ao cálculo dos parâmetros do auto-ajuste de forma inteligente que será objeto dessa dissertação. No trabalho proposto por Pereira (2014) esses ajustes são calculados no perfil de carga do ponto do regulador de tensão acessando diretamente a memória do mesmo. O controle local define os parâmetros mesmo sem a comunicação ativa com o sistema supervisor.

Segundo Ibrahim e Salama (2015), a realização do Controle de Tensão e Potência Reativa (Controle Volt/Var – VVC) é essencial para manter a tensão em níveis adequados em todos os pontos do alimentador de distribuição. Esse controle é realizado a partir da utilização dos equipamentos instalados no sistema considerando as mais diversas condições de operação.

Recentemente, novos benefícios têm sido apresentados com o controle Volt/VAR, fornecendo suporte à evolução das redes elétricas inteligentes. O *Electric Power Research Institute* (EPRI) cita algumas vantagens. A redução de perdas técnicas por meio da otimização da tensão, gerenciamento de demanda, manutenção da tensão após autorrecuperação, controle dinâmico da tensão com adesão de geração distribuída de fontes renováveis.

No trabalho desenvolvido por (MELLO, 2016), a seguinte função objetivo é usada para reduzir perdas de energia usando o método de VCC.

$$FO = \min \sum_i R_i \cdot \frac{P_i^2 + jQ_i^2}{V_i^2} \cdot \Delta t \quad (4)$$

Onde R_i é o valor da resistência da linha i , P_i e Q_i são os valores de fluxo de potência ativa e reativa, respectivamente. V_i é o valor da tensão para o nó i . Este modelo é funcional respeitando as seguintes restrições com operação em níveis permissíveis:

- $V_{i,\min} < V_i \leq V_{i,\max}$;
- $a_{ij,\min} \leq a_{ij} \leq a_{ij,\max}$
- $0 \leq Q_{ci} \leq Q_{ci,\max}$
- $I_{ij} \leq I_{ij,\max}$
- $P_{\min} \leq P_{GDn} \leq P_{\max}$

Onde: a_{ij} é o menor TAP permitido no transformador e regulador de tensão do circuito i - j e $a_{ij,\max}$ é o maior TAP permitido no transformador e regulador de tensão do circuito i - j . $Q_{ci,\max}$ é o maior valor de potência reativa capacitiva permitido na barra i . $I_{ij,\max}$ é a corrente máxima admissível do equipamento ou condutor no ramo i - j . P_{GDn} é a potência ativa fornecida pelo gerador distribuído n . Os valores P_{\min} e P_{\max} dependem da tecnologia de GD considerada.

A técnica de troca de ramos foi usada para procurar soluções ótimas fazendo abertura e fechamentos de ramos vizinhos a cada iteração. Para a realização do processo de reconfiguração, é necessário verificar o atendimento das restrições operacionais, incluindo o módulo das tensões em cada nó da rede. A atuação do controle Volt/Var de lógica difusa ocorre quando a tensão na barra i se encontra fora da faixa de 0,93 a 1,05 p.u. definido nos procedimentos de distribuição. Para aplicar o controle Volt/Var é necessário executar um procedimento de modelagem dos controladores usando lógica Fuzzy e o processo analítico hierárquico (AHP). Esse processo assume que a decisão é ligada a uma função utilidade que usa a relação de importância entre os equipamentos de controle da rede.

No seu trabalho o autor os resultados foram avaliados considerando um ambiente de simulação aplicando uma rede IEEE de 34 nós modificada com objetivo de reduzir as perdas do sistema. Os resultados do trabalho mostraram ganhos em termos de redução das perdas elétricas através do uso da técnica de troca de ramos. No entanto, tanto a configuração inicial quanto a reconfigurada apresentavam transgressões de tensão, sendo necessário usar a técnica de Volt/Var para minimizar as transgressões. Por fim, o autor conclui que as duas técnicas combinadas são eficientes em reduzir as perdas elétricas e ao mesmo tempo gerar melhor ajustes dos equipamentos reduzindo as transgressões de tensão.

Seguindo a lógica do sistema de controle apresentado por Albuquerque (2002), o foco deste trabalho será no nível primário de hierarquia de controle de tensão, uma vez que, as ações realizadas serão em nível de controle local. Neste ponto, as ações propostas possuem foco nos autotransformadores reguladores de tensão, pois esses equipamentos são cada vez mais utilizados em redes de distribuição. Além disso, o uso dos reguladores de tensão como componente do controle inteligente de tensão está de acordo com os fundamentos de redes de distribuição inteligentes apresentados no trabalho de Falcão (2010). Por consequência, o conhecimento de suas diferentes tecnologias, propriedades de construção e funcionamento

como discutido por (De Mello et al. (2010) e Spatti (2011) são fundamentais para desenvolver a aplicação.

Os resultados do trabalho de Spatti (2011) mostram que os reguladores de tensão eletrônicos possuem tempos de respostas mais curtos para mudança de TAP em relação aos reguladores tradicionais. Mesmo assim, esse trabalho utiliza como objeto de estudo, reguladores de tensão elétricos. Essa diferenciação de foco frente a melhor alternativa técnica, ocorre devido ao maior número de reguladores de tensão elétricos nas redes de distribuição existentes. A estratégia de controle adotada por Spatti (2011) foi a de modificar o ajuste da tensão de referência, avaliando os resultados a partir de simulações, utilizando dados de um sistema real. Posteriormente foi implementada a estratégia de controle em uma máquina dedicada para a alteração dos parâmetros do regulador de tensão da subestação. No entanto não foram apresentadas as características do relé utilizado nem dos componentes físicos utilizados para este fim. Apesar da estratégia de controle utilizada neste trabalho ser divergente em relação ao adotado por Spatti (2011), o conceito de utilizar dados de um alimentador real é mantida.

Os ajustes dos parâmetros dos reguladores de tensão tais como, tensão de referência, insensibilidade, temporização e compensação de linha serão desenvolvidos com base no trabalho de Pereira (2014). A atuação do controle inteligente proposto ocorrerá em base local e com acesso direto à memória dos reguladores de tensão. O acesso será através da porta de comunicação do regulador, buscando os registros de tensão de entrada e saída, carregamento (P, Q e I) e posição de TAP. Os valores de leitura devem ser constantemente monitorados e comparados com a curva utilizada, de modo a recalcular os parâmetros, caso as leituras se distanciem da curva teórica. A tensão de referência e as compensações de queda de linha (U_r e U_x) serão geradas usando regras heurísticas. A temporização será gerada mantendo o uso de lógica fuzzy devido a sua facilidade de implementação, sucesso em aplicações anteriores e baixo custo computacional. A divergência em relação trabalho de Pereira (2014) será em relação ao parâmetro de Insensibilidade. Neste caso não será desenvolvido um método de cálculo, utilizando o valor padrão do fabricante do regulador de tensão. A comunicação entre dispositivos respeitará as regras do protocolo presente no regulador de tensão utilizado nos testes. Para tanto, essa tarefa requisita um conhecimento específico das relações de mestre-escravo do protocolo DNP3, como exposto no trabalho de (CURTIS, 2005). Este é um passo fundamental para garantir a comunicação entre o controlador existente e os dispositivos usados neste trabalho.

Com base na avaliação geral dos microcontroladores comerciais existentes apresentado, este trabalho vai utilizar as arquiteturas AVR e ARM. Microcontroladores baseados nessa arquitetura possuem a característica de serem de fácil uso, baixo custo e compactos. Essas vantagens os tornam aptos para atender o objetivo de desenvolvimento deste trabalho.

A lógica de programação proposta neste trabalho será do tipo concorrente e realizada com base nos conhecimentos de sistemas de tempo real obtidos no trabalho de Burns (1989). A aplicação é de tempo real do tipo não crítica, uma vez, que a lógica proposta terá prioridade inferior frente as atuações de controle dos níveis secundário e terciário. Entende-se que a programação concorrente tem vantagens importantes em relação a sequencial para a aplicação selecionada, tais como, maior robustez a falhas em alguma etapa da sequência da lógica. Cabe também ressaltar o menor tempo de leitura de dados, melhor uso da memória e processador

do microcontrolador. O Quadro 3 apresenta de forma resumida as principais relações entre as referências apresentadas e o trabalho proposto.

Quadro 3 Principais referências e relação com o trabalho proposto.

Autor	Título	Relação com o trabalho
Falcão (2010)	Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid	Conceitos e tecnologias de redes inteligentes
Albuquerque (2002)	Controle coordenado de tensão e potência reativa	Controle de tensão inteligente em redes de distribuição de energia elétrica
De mello et al. (2010)	Definição do Perfil de Tensão Ideal para Operação de Redes de Distribuição	
Spatti (2011)	Regulação automática de tensão em transformadores de subestação de distribuição usando implementação fuzzy	
Pereira (2014)	Controle hierárquico e adaptativo para aumento do desempenho operacional de reguladores de tensão em redes elétricas inteligentes	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

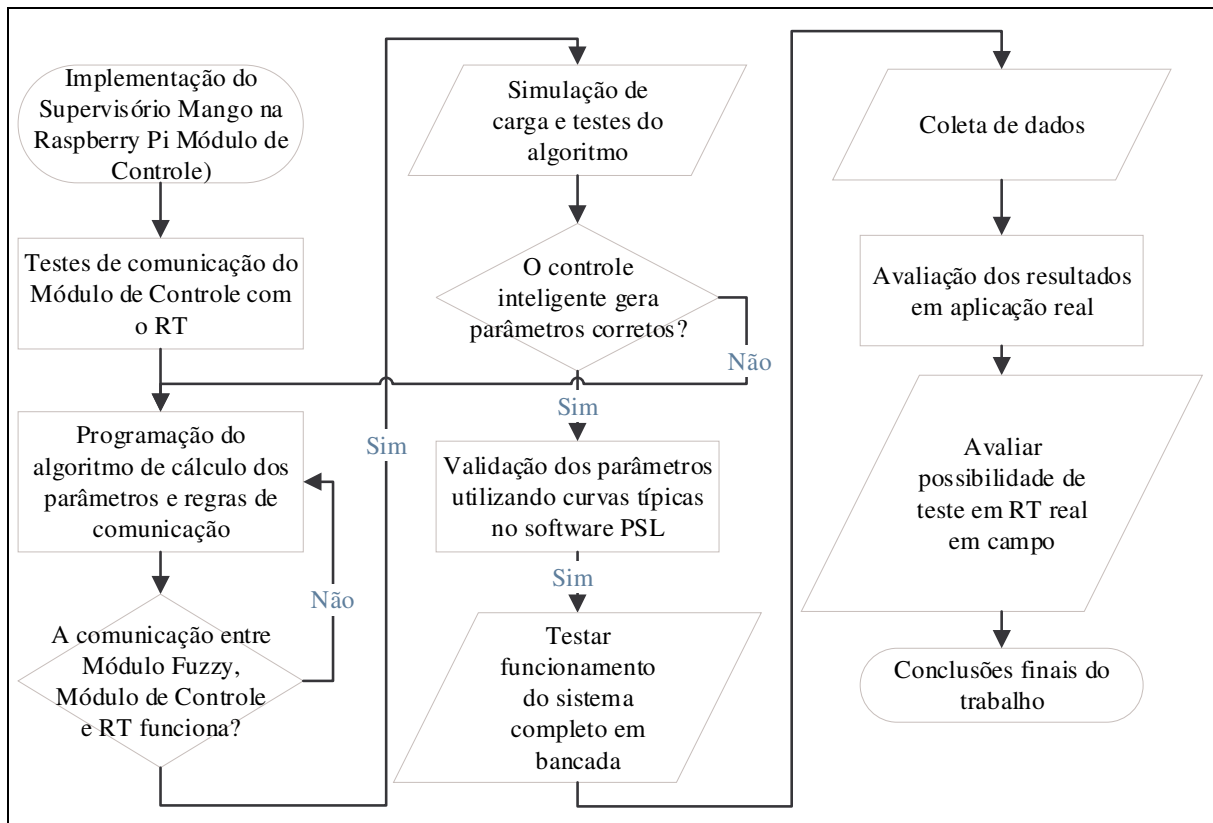
3.1 Considerações finais do capítulo

A revisão apresentada neste capítulo foi realizada através de pesquisas na biblioteca da UNISINOS e repositórios acessados através de sítios de busca. Em geral, utilizou-se a premissa de trabalhar com as publicações mais recentes, fazendo referência aos conceitos já consolidados em trabalhos anteriores. Inicialmente, as palavras-chaves presentes no resumo deste trabalho foram utilizadas para construir uma visão dos conceitos gerais envolvidos. Depois foram elencados os principais temas específicos para possibilitar a pesquisa em maior profundidade. Nesta fase, foi possível estabelecer relações diretas com trabalhos de outros autores. Uma vez finalizada a revisão dos principais conceitos de base e pesquisas anteriores relacionadas com o tema, concluem-se os alicerces de sustentação dos métodos propostos para atingir os objetivos do trabalho.

4 METODOLOGIA

No decorrer deste capítulo será apresentada a metodologia de trabalho em detalhes a fim de atingir os objetivos propostos. A metodologia proposta neste capítulo tem o objetivo implementar a função de auto-ajuste no regulador de tensão utilizando um sistema embarcado. O sistema embarcado, para prova de conceito, é composto por uma placa Raspberry Pi 3 e um microcontrolador Arduino Uno. De forma ilustrativa, apresenta-se a Figura 14 que contempla um resumo das principais etapas do trabalho.

Figura 14 Fluxograma de trabalho proposto.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para possibilitar a troca de informações entre o microcontrolador e o regulador de tensão é necessário implementar um dispositivo intermediário, chamado deste ponto adiante de Módulo de Controle. Em síntese, esse dispositivo, tem a missão de traduzir as mensagens entre os protocolos e calcular parte dos parâmetros de controle do regulador de tensão. O microcontrolador, chamado deste ponto em diante de Módulo Fuzzy, tem o objetivo de calcular o parâmetro Temporização através da implementação de uma lógica fuzzy. Esse desenvolvimento é necessário para permitir a aquisição dos dados de potência ativa e reativa, níveis de tensão, fator de potência e sentido de fluxo de potência do nó onde está o regulador de tensão. Por fim, essa arquitetura possibilita o envio dos parâmetros de controle estabelecidos pelo controle dinâmico inteligente.

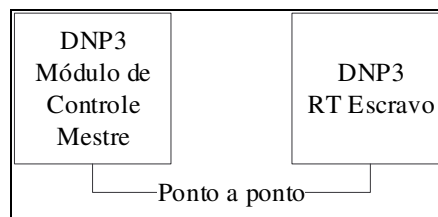
A grande vantagem da aplicação do controle individual, reside no fato de possibilitar o processamento distribuído dos parâmetros de controle, atuando como um sistema distribuído inteligente. Isso é realizado com base nas leituras de cada um dos reguladores de tensão e condição de realizar o auto ajuste.

4.1 Implementação do Sistema de Supervisão no Módulo de Controle

Para o desenvolvimento da interface entre o regulador de tensão e os módulos de Controle e Fuzzy, bem como o sistema supervisor centralizado e o controle local, optou-se pela aplicação de um sistema supervisor, embarcado no dispositivo. Assim, foi instalada a versão livre do sistema Mango Automation, da empresa Infinity Automation na raspberry Pi 3.

Para tanto, primeiramente é necessário implementar uma relação de mestre e escravo para o Módulo de Controle e o regulador de tensão, respectivamente. A Figura 15 abaixo apresenta o primeiro passo deste trabalho.

Figura 15 Protocolo de comunicação DNP3 implementado entre o regulador e tensão e o microcontrolador ARM.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O Módulo de Controle é composto por um sistema supervisor e um algoritmo de controle embarcados no mini-PC Raspberry Pi 3, o qual tem três funções fundamentais:

- 1) Realizar as leituras das variáveis de operação do regulador de tensão através do protocolo DNP3 e disponibilizar os mesmos dados para o cálculo dos parâmetros do auto-ajuste internamente e no Módulo Fuzzy;
- 2) Calcular os parâmetros de controle do Regulador de Tensão, Tensão de Referência (U_{REF}), Compensação Ativa (U_R) e Compensação Reativa (U_X).
- 3) Disponibilizar acesso de leitura e escrita às variáveis e parâmetros de controle do regulador de tensão para o sistema de controle centralizado SCADA.

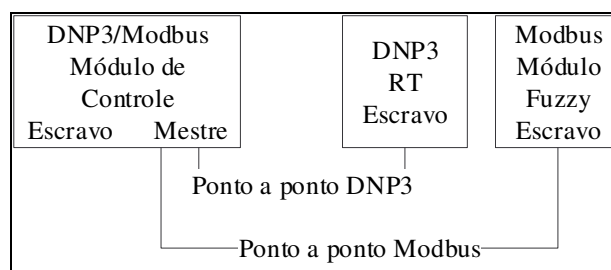
O Módulo Fuzzy é composto por um algoritmo de cálculo do parâmetro temporização utilizando uma lógica fuzzy embarcado em um microcontrolador Arduino Uno, o qual possui as seguintes funções:

- 1) Obter os dados de tensão lado fonte e variação da potência aparente capturadas pelo Módulo de Controle;
- 2) Calcular o parâmetro temporização com base nas entradas mencionadas anteriormente e disponibilizar o valor resultante para o Módulo de Controle.

O Módulo de Controle possui o *software* supervisorio Mango Automation instalado, cujo objetivo é de traduzir as mensagens entre os protocolos DNP3 e Modbus. O protocolo ModBus é necessário, pois o Modulo Fuzzy, implementado na placa Arduino Uno, se comunica através desse protocolo. Como o objetivo do trabalho e impacto estão orientados a produzir um controle inteligente de tensão priorizou-se os esforços nesse sentido e, com isso, optou-se por uma solução mais rápida quanto a transferência de mensagens entre os dispositivos. O supervisorio utilizado foi escolhido em função da compatibilidade com LINUX, utilizado na RaspberryPi. Para aplicações futuras, também é possível avaliar outro sistema de supervisão ou ainda desenvolver um supervisorio específico para a aplicação considerada.

Uma vez que o protocolo ponto a ponto funciona de forma adequada foi dado continuidade para os testes considerando o Módulo Fuzzy embarcado no microcontrolador Arduino Uno. Esse dispositivo opera como externo ao ambiente de supervisão, conforme pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 Protocolo de comunicação entre o Módulo de Controle, regulador de tensão e o Módulo Fuzzy.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

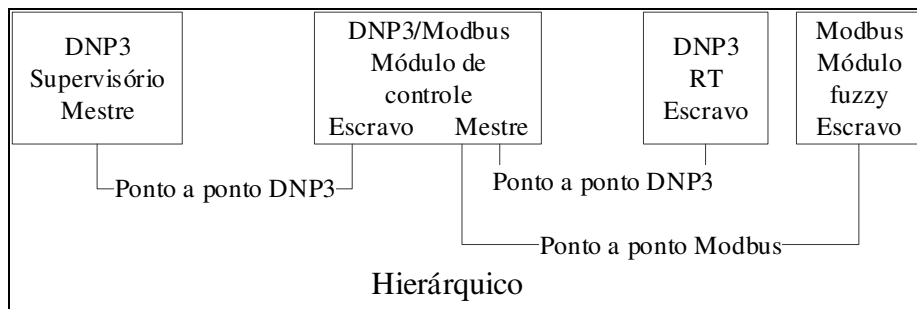
Nesta fase, torna-se possível testar o cálculo dos parâmetros do controlador do regulador de tensão em nível local, pois o Módulo de Controle busca os dados no regulador de tensão através da relação mestre escravo calculando parte dos parâmetros. As variáveis necessárias para calcular a temporização são escritas pelo Módulo de Controle no Módulo Fuzzy. Esse módulo disponibiliza o resultado de acordo com o comportamento do carregamento e variação de tensão na linha para o Módulo de Controle.

O sistema supervisorio centralizado atua no controle da tensão através do monitoramento dos patamares de carga e com ações corretivas utilizando algoritmos de controle e os diversos dispositivos espalhados ao longo da rede de distribuição. Esses dispositivos incluem reguladores de tensão, seccionadoras de atuação remota, banco de capacitores, configuração das redes, entre outros. Assim, o supervisorio garante que a

hierarquia do controle de tensão seja realizada de forma centralizada respeitando uma matriz de hierarquia estabelecida para o conjunto de reguladores do alimentador.

Para tanto, é acrescentada a estrutura do controle hierárquico do supervisor (SCADA) com função de mestre em relação ao Módulo de Controle e, o Módulo de Controle como mestre do RT e do Módulo Fuzzy. A arquitetura final de comunicação está apresentada na Figura 17.

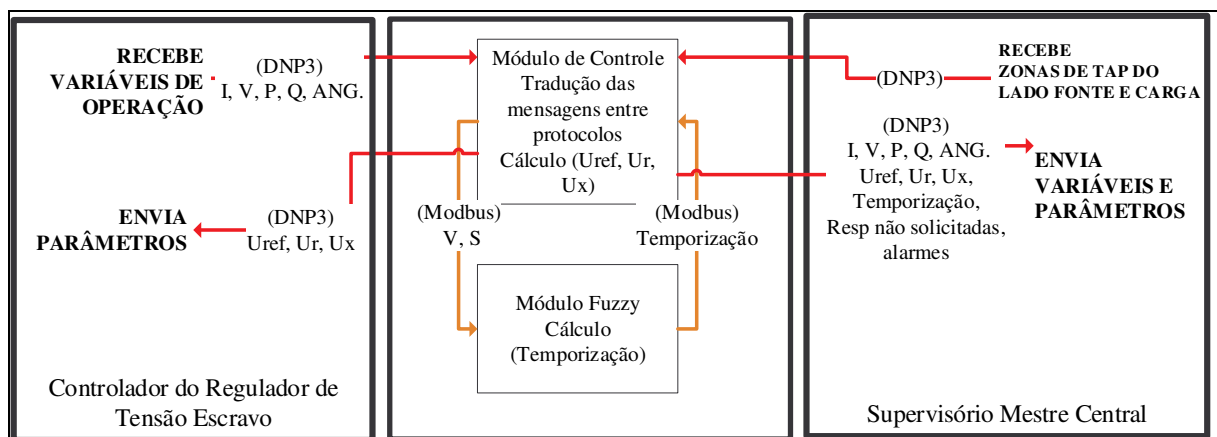
Figura 17 Relação hierárquica do protocolo DNP3 aplicado ao controle de tensão



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A partir da estruturação do protocolo será concluído o Módulo de Controle, caracterizado como portas DNP3/Serial (SCADA - Módulo de Controle), DNP3/Serial (Módulo de Controle – RT) e Modbus/Serial (Módulo de Controle - Módulo Fuzzy). A estrutura proposta para o controle inteligente local está presente na Figura 18.

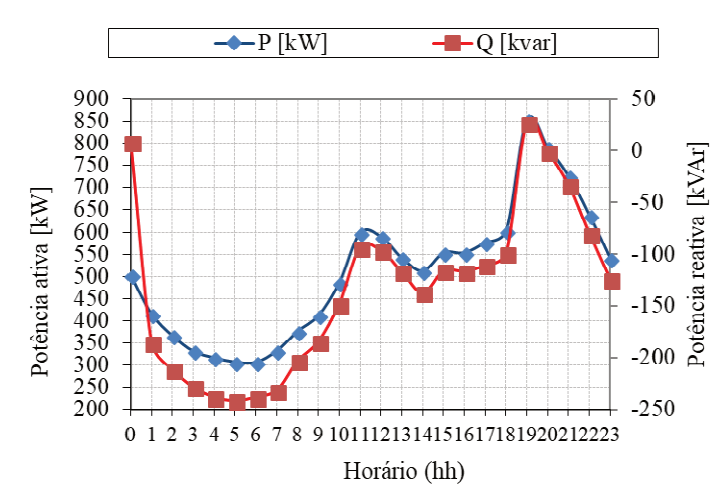
Figura 18 Diagrama de blocos do sistema de controle local.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

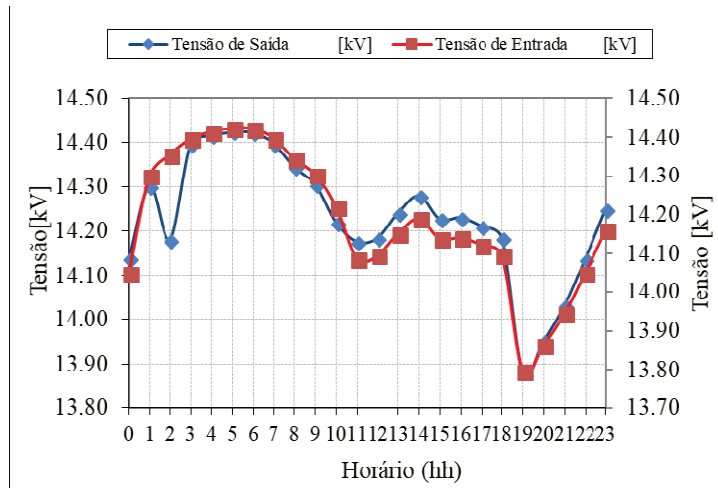
O período de análise dos dados para cálculo dos parâmetros é de 7 dias. Essa escolha se dá para monitorar possíveis transições de perfil ocasionadas pelo efeito da sazonalidade da carga. As Figura 19, Figura 20 e Figura 21 apresentam exemplos das curvas necessárias para atender a coleta de dados, considerando dia útil.

Figura 19 Exemplo de curva horária de perfil potência que será lida no RT.



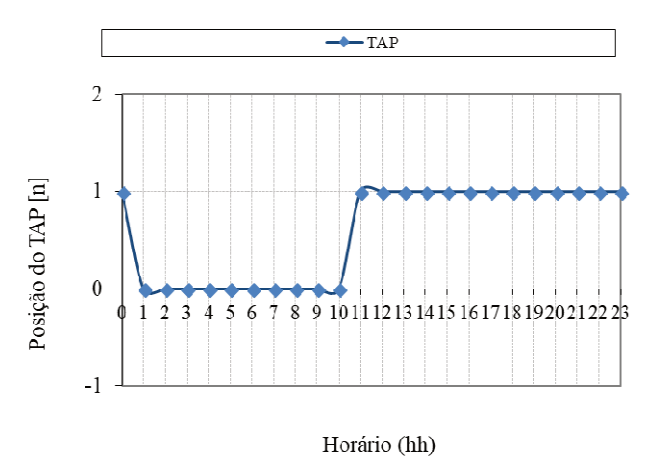
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 20 Exemplo de curva horária de perfil de tensão que será lida no RT.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 21 Exemplo de posição de curva de posição de TAP do RT.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Assim pode-se basear a definição de U_{Ref} , U_R e U_X nos dados das curvas de potência. Nesta etapa, apenas fluxo direto será considerado para simplificar a análise. No entanto, o método pode ser também aplicado para condições de fluxo inverso. Os parâmetros U_R , U_X e U_{REF} serão calculados utilizando as equações da seção 3, tendo como fonte de dados de cada variável, a memória do regulador de tensão. Segue abaixo, o descritivo de cada variável:

- P_{MAX} : Valor máximo de potência ativa em um período de 24 h armazenada no controlador referente a um dia da semana equivalente ao que será utilizado para ajustar os parâmetros.
- RTP: Relação de transformação de potência do auto-transformador. Esta é uma entrada manual ou pode ser uma requisição dos dados do regulador pelo protocolo.
- U_{PMAX} : Tensão nominal da rede no ponto de instalação do regulador, multiplicada por um fator de 1,03, adequada conforme a zona de TAP dos transformadores de distribuição, unidade em kV. Esta é uma entrada manual ou pode ser uma requisição dos dados do regulador pelo protocolo.
- U_{PMIN} : Tensão nominal da rede (zona de TAP) multiplicada por 0,95 unidade em kV. Esta é uma entrada manual ou pode ser uma requisição dos dados do regulador pelo protocolo.
- I_{MAX} : Valor máximo de corrente em um período de 24 h armazenada no controlador referente a um dia da semana equivalente ao que será utilizado para ajustar os parâmetros.
- $\cos(\phi_{PMAX})$: Busca-se o valor do ângulo ϕ no momento de carregamento mais alto. Depois calcula-se o cosseno, gerando o valor $\cos(\phi_{PMAX})$. Esta variável pode ser requisitada via protocolo através do monitoramento do fator de potência.
- $\sin(\phi_{PMAX})$: Busca-se o valor do ângulo ϕ no momento de carregamento mais alto. Depois calcula-se o seno, gerando o valor $\sin(\phi_{PMAX})$.
- I_{nom} : Corrente nominal no regulador de tensão em A. Esta é uma entrada manual ou pode ser uma requisição dos dados do regulador pelo protocolo.

Os dados utilizados e os parâmetros calculados são referentes ao dia da semana correspondente a data atual, avaliando o histórico semanal obtido a partir da memória do regulador. Por exemplo, se o dia a ser ajustado é uma segunda-feira, será utilizado a curva da segunda-feira imediatamente anterior. Para o caso dos valores limites de tensão máxima e mínima, foram utilizados fatores de multiplicação que permitem uma operação adequada, sem transgressão dos limites do PRODIST. No caso do limite superior, foi utilizado um fator de 3%, uma vez que o limite superior do Prodist ter um limite máximo de 5% excedente da tensão nominal. Desta forma, com um valor menor é esperado que o controle seja mais ágil para corrigir variações antes de que pontos da rede estejam mais suscetíveis a tensões críticas. Semelhante ao caso anterior, para o limite de tensão mínima é utilizado um valor de 5%, mais conservador, visando ter um controle que diminua a probabilidade de gerar afundamentos de tensão na rede.

Uma vez calculados os parâmetros, estes serão enviados para o RT. O envio dos parâmetros terá frequência a cada 30 segundos respeitando as regras de comunicação do protocolo DNP3. No caso dos parâmetros U_{REF} , U_R e U_X a atualização dos valores terá frequência diária e de acordo com o dia correspondente da semana. Os parâmetros enviados são referentes ao mesmo dia da semana, mas com defasagem de 7 dias. Com isso, espera-se ter uma boa correlação da curva atual com a curva projetada, uma vez que, a tendência de consumo elétrico vai ser considerada conforme todas as curvas são atualizadas semanalmente. A temporização tem seu valor calculado com uma maior frequência, pois espera-se que as variações horárias ou até mesmo instantâneas de carga possam ser usadas para tornar a reação do controle de tensão mais eficaz.

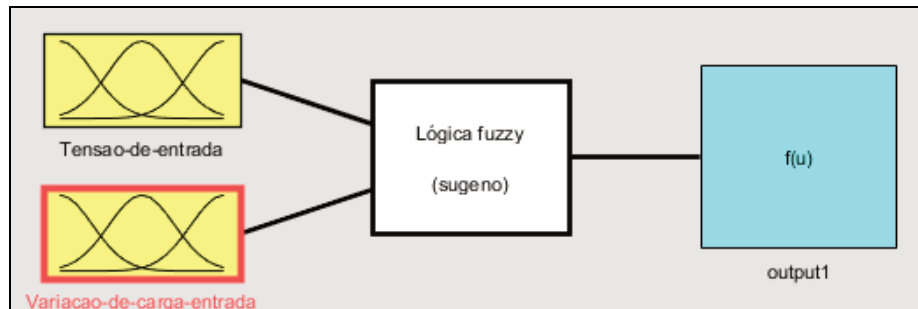
A partir da curva modelada P e Q , os dados gerados localmente serão coletados para montar a curva diária em tempo real. O parâmetro de temporização será definido através de uma lógica fuzzy. A teoria de modelagem e controle fuzzy trata do relacionamento entre entradas e saídas, agregando vários parâmetros de processo e de controle. Isso permite a consideração de processos complexos, de modo que os sistemas de controle resultantes proporcionam um resultado mais acurado, além de um desempenho estável e robusto. A grande vantagem dessa técnica é a simplicidade de implementação, pois pode reduzir a complexidade de implementação de um projeto.

As funções de pertinência escolhidas para este controle são a Tensão na entrada e Variação da carga. O objetivo de utilizar a tensão na entrada do regulador é de aplicar os intervalos de tensão crítica, precária e adequada conforme regulamento do Prodist. A variação na carga visa avaliar mudanças de perfil de consumo de forma a reduzir o tempo de resposta de controle de forma coerente com o tamanho da variação. Por exemplo, considerando o caso da tensão de entrada do regulador apresentar-se na faixa precária e com grandes variações de carga, é necessário um tempo relativamente curto para a resposta do RT. Entende-se que as variações de tensão de curta duração podem prejudicar a imagem da empresa e são atualmente parâmetros avaliados pelo Prodist. Desta forma, a proposta é de obter uma resposta para a temporização com comportamento que minimize o tempo de resposta do controle conforme aumentem as variações de carga e a tensão no regulador se afaste da faixa adequada.

A leitura da tensão de entrada para estabelecer a temporização será a cada 5 segundos, uma vez que, tempos maiores podem acarretar em temporizações ineficientes principalmente em transições de carga. Os dados de temporização não serão armazenados na memória do controlador. A lógica fuzzy construída possui 2 funções de entrada, 15 regras e uma função de

saída que é a temporização. A Figura 22 apresenta o resumo da lógica desenvolvida. O programa utilizado para esta modelagem inicial foi o Matlab®.

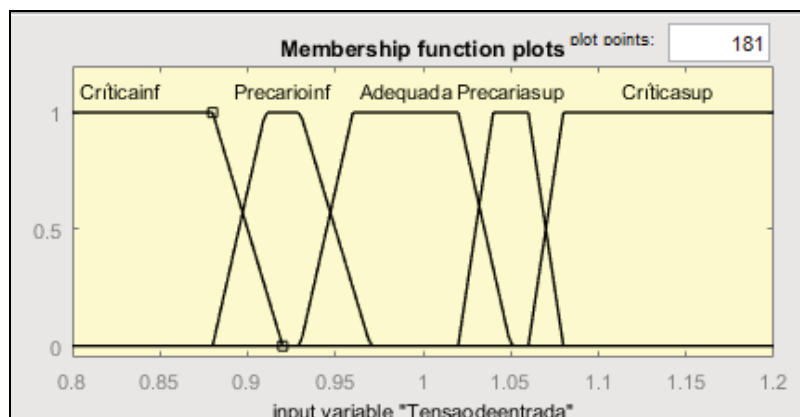
Figura 22 Resumo da lógica fuzzy desenvolvida.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Extraído do programa Matlab®.

Para a tensão de entrada representada na Figura 23, uma função trapezoidal foi escolhida, com base nos limites de tensão do Prodist para tensão de referência de 13.8 kV. Este caso considera a zona de TAP 1. É importante destacar que caso a zona de TAP do regulador de tensão seja alterada é necessário recalculer os parâmetros da lógica fuzzy visando ter um cálculo correto do parâmetro temporização.

Figura 23 Função de pertinência para tensão de entrada.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Extraído do programa Matlab®.

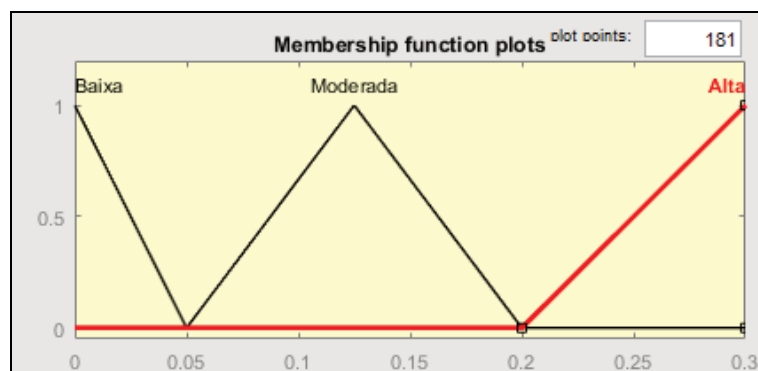
Para contornar essa situação e tornar o sistema adequado a outras redes, o Quadro 4. construído com valores de tensão em pu.

Quadro 4 Parâmetros da lógica fuzzy para a tensão na entrada.

		Parâmetros			
Subconjunto	Função	a	m	N	B
Crítico Inferior	Trapezoidal	0,7	0,7	0,88	0,92
Precário Inferior	Trapezoidal	0,88	0,91	0,93	0,97
Adequada	Trapezoidal	0,93	0,96	1,02	1,05
Precária Superior	Trapezoidal	1,02	1,04	1,06	1,08
Crítica superior	Trapezoidal	1,06	1,08	1,3	1,3

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A função de variação da carga na entrada representada na Figura 24 foi modelada utilizando funções triangulares, categorizando a variação na carga como baixa, moderada e alta. Essa variável é calculada de acordo com a variação percentual da potência aparente entre leituras. A lógica utilizada para delimitação dos limites foi heurística.

Figura 24 Função de pertinência de variação de carga na entrada.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Extraído do programa Matlab®.

Da mesma forma foi construído o Quadro 5 representando os parâmetros da variação da carga.

Quadro 5 Parâmetros da lógica fuzzy para a função de variação da carga de entrada.

		Parâmetros		
Subconjunto	Função	a	M	n
Baixa	Triangular	0	0	12
Moderada	Triangular	10	15	20
Alta	Triangular	18	30	30

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A função de saída é a função temporização, sendo esta gerada pela aplicação de regras da lógica fuzzy. No total foram geradas 7 funções de saída frente as funções de entrada. O tempo mínimo para sensibilização do controle foi estipulado em 16 s. Este resultado representa o pior caso de controle de tensão, sendo composto por uma tensão crítica inferior ou posterior combinado a uma variação alta na tensão. O Quadro 6 apresenta a relação entre as variáveis de entrada e a saída.

Quadro 6 Resultados da lógica fuzzy especificada.

Variáveis de entrada		Função de saída	
Tensão na entrada	Variação na tensão	Temporização	Tempo (s)
Crítico Inferior	Baixa	3	28
Crítico Inferior	Moderada	2	22
Crítico Inferior	Alta	1	16
Precário Inferior	Baixa	5	40
Precário Inferior	Moderada	4	34
Precário Inferior	Alta	3	28
Adequada	Baixa	7	52
Adequada	Moderada	6	46
Adequada	Alta	5	40
Precária Superior	Baixa	5	40
Precária Superior	Moderada	4	34
Precária Superior	Alta	3	28
Crítica superior	Baixa	3	28
Crítica superior	Moderada	2	22
Crítica superior	Alta	1	16

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A diferença de tempo para cada patamar de resposta aumenta em 2 s, de modo, que quanto mais o patamar se aproxima da resposta 7 menor serão os impactos vistos na tensão de entrada. Em outras palavras isso significa que a tensão está controlada e o movimento de TAP deve ser minimizado para evitar desgaste desnecessário no RT. O maior tempo de resposta correspondente ao patamar 7 sendo de 52 s. Estes tempos de resposta são considerados adequados para atenuar variações temporárias de tensão, ou seja, superiores à 3 s e inferiores a 3 minutos de acordo com o módulo 8 do Prodist.

O parâmetro temporização será calculado em tempo real pelo Módulo Fuzzy, com atualização a cada 15 segundos. Nesta frequência este valor será enviado para o Módulo de Controle, a qual disponibilizará para o RT. Caso o controle centralizado necessite operar com

um valor de temporização diferente da proposta, o valor final utilizado será o do supervisor, respeitando a hierarquia de controle.

4.2 Implementação do algoritmo de temporização no Módulo Fuzzy

O Módulo Fuzzy foi configurado para a comunicação com o Módulo de Controle utilizando o protocolo Modbus. Assim foi utilizada a biblioteca Modbusino.h, com código aberto e disponível no repositório <https://github.com/stephane/modbusino>. A lógica de programação inclui o processamento de dados em uma única tarefa, a qual funciona por tempo indeterminado sempre que o dispositivo estiver energizado. A biblioteca Efl.h é utilizada para a programação da lógica fuzzy parametrizada para fornecer o parâmetro temporização. A Figura 25 destaca as bibliotecas utilizadas para desenvolver o cálculo do parâmetro temporização.

Figura 25 Declaração das bibliotecas utilizadas e registradores ModBus.

```
1  /*Algoritmo para cálculo inteligente e dinâmico de reguladores de tensão
2  | Autor: Felipe De Carli.*/
3
4  /*Declaração das bibliotecas usadas.*/
5
6  #include "stdio.h"
7  #include "stdlib.h"
8  #include "ctype.h"
9  #include "string.h"
10 #include "Modbusino.h"
11 #include "Wire.h"
12 #include "RTCLib.h"
13 #include "FuzzyRule.h"
14 #include "FuzzyComposition.h"
15 #include "Fuzzy.h"
16 #include "FuzzyRuleConsequent.h"
17 #include "FuzzyOutput.h"
18 #include "FuzzyInput.h"
19 #include "FuzzyIO.h"
20 #include "FuzzySet.h"
21 #include "FuzzyRuleAntecedent.h"
22 #include "stdio.h"
23 #include "stdlib.h"
24 #include "ctype.h"
25 #include "string.h"
26 #include "Modbusino.h"
27 #include "Wire.h"
28
```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido na plataforma Arduino Uno.

As variáveis de operação que são enviadas através do protocolo ModBus são declaradas como inteiros com tamanho de 2 bytes. As variáveis utilizadas somente para cálculos internos são declaradas como inteiros e pontos flutuantes de 4 bytes (Figura 26). Isso se deve ao fato de que a biblioteca ModBus utilizada trabalhar com a limitação de números inteiros de 2 bytes. No entanto, como isso não representa uma limitação significativa para o algoritmo de controle, pode-se trabalhar com essa restrição.

Figura 26 Declaração de variáveis internas do algoritmo de controle.

```

32
33 #if defined(ARDUINO_ARCH_SAMD)
34 #define Serial SerialUSB
35 #endif
36
37 //Inicializa o ID do Dispositivo.
38 ModbusinoSlave modbusino_slave(1);
39
40 //Aloca o Número de Registradores.
41 uint16_t tab_reg[10];
42
43 // Instanciando um objeto da biblioteca.
44 Fuzzy* fuzzy = new Fuzzy();
45
46 FuzzySet* crit_inf = new FuzzySet(10050, 10050, 12640, 13350);
47 FuzzySet* prec_inf = new FuzzySet(12950, 13370, 13640, 13910);
48 FuzzySet* adeq = new FuzzySet(13640, 13820, 14400, 14820);
49 FuzzySet* prec_sup = new FuzzySet(14440, 14710, 14990, 15240);
50 FuzzySet* crit_sup = new FuzzySet(15000, 15200, 16300, 16700);
51
52 FuzzySet* carr_bai = new FuzzySet(0, 0, 0, 12);
53 FuzzySet* carr_med = new FuzzySet(10, 15, 18, 20);
54 FuzzySet* carr_alto = new FuzzySet(18, 30, 30, 30);
55
56 /*Variáveis para cálculo e envio do parâmetro temporização.*/
57 uint32_t dP;
58 uint32_t Med_Tenfon_1_min_fuzzy;
59 uint32_t Temp_1_fuzzy;
60

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido na plataforma Arduino Uno.

Primeiramente é necessário configurar as funções de entrada que são construídas com base nas variáveis Variação da Carga e Tensão do lado fonte. A Tensão do Lado Fonte, chamada de `Med_Tenfon_1_min_fuzzy`, é configurada segundo os limites do Prodist para uma rede de média tensão com tensão de referência em 13800 V. A tensão do lado fonte é lida pelo Módulo de Controle e enviada para o Módulo Fuzzy diretamente, sem tratamento.

A variação no carregamento, chamada de `dP`, é calculada no Módulo de Controle e enviada para o Módulo Fuzzy em uma base percentual. As funções são configuradas de acordo com a metodologia apresentada no capítulo 4. Este cálculo tem objetivo de avaliar se houve variações no perfil de carga no ponto de medição.

O cálculo da Variação no carregamento é realizado no Módulo de Controle usando o algoritmo apresentado na Figura 27, o qual considera o valor instantâneo comparado com a média da hora anterior.

Figura 27 Algoritmo de preparação da variável de variação de carga.

```

codigov14_fuzzy.c x dP.java x
1 var dP
2 S.value;
3 dP = Math.abs(S.past(HOUR).average - S.value) / S.past(HOUR).average * 100;
4 return dP;

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido na plataforma de programação Javascript.

O algoritmo busca o valor da potência aparente, dada pela variável S e calcula a diferença absoluta entre a média da potência aparente da última hora e o valor instantâneo. Então, o valor obtido é dividido pela média da última hora e multiplicada por 100, gerando a variação percentual. Sempre que a potência instantânea se afastar do resultado anterior, a lógica fuzzy proposta irá calcular a temporização resultando em novos valores. Cabe ressaltar que os limites de variação considerados são baseados na experiência profissional e heurística. Sugere-se que em testes futuros utilizando esses parâmetros, pode-se buscar um ajuste que melhore ainda mais o controle. O envio do parâmetro calculado do Módulo de Controle para o Módulo Fuzzy segue o mesmo padrão apresentado na sessão 4.1. deste trabalho.

Em seguida é realizada a montagem das funções da lógica fuzzy, de acordo com a configuração realizada e apresentada na Figura 28. Este procedimento é realizado dentro da função setup() do Módulo Fuzzy, seguindo as regras da biblioteca utilizada, como mostra a Figura 28.

Figura 28 Montagem das funções de entrada para cálculo da temporização.

```

58 void setup()
59 {
60
61 //FuzzyInput
62 FuzzyInput* Tensao_1 = new FuzzyInput(1);
63 Tensao_1->addFuzzySet(crit_inf);
64 Tensao_1->addFuzzySet(prec_inf);
65 Tensao_1->addFuzzySet(adeq);
66 Tensao_1->addFuzzySet(prec_sup);
67 Tensao_1->addFuzzySet(prec_sup);
68 Tensao_1->addFuzzySet(crit_sup);
69
70 fuzzy->addFuzzyInput(Tensao_1);
71
72 //FuzzyInput
73 FuzzyInput* Carregamento_1 = new FuzzyInput(2);
74 Carregamento_1->addFuzzySet(carr_bai);
75 Carregamento_1->addFuzzySet(carr_med);
76 Carregamento_1->addFuzzySet(carr_alto);
77
78 fuzzy->addFuzzyInput(Carregamento_1);
79

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido na plataforma de programação do Arduino Uno.

Em seguida é necessário configurar as configurações de velocidade da porta serial e, do protocolo ModBus, como mostra a Figura 29.

Figura 29 Configuração da porta serial, protocolo Modbus e relógio de tempo real.

```

243 /*Definindo a taxa de transferencia em bauds.*/
244 modbusino_slave.setup(9600);
245 analogReference(DEFAULT);
246 Serial.begin(9600);

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido na plataforma de programação do Arduino Uno.

As regras da lógica fuzzy são escritas seguindo o procedimento da biblioteca utilizada. Como descrito no Capítulo 4 deste trabalho são utilizadas 15 regras de acordo com as combinações de variação do carregamento no ponto de medição e tensão do lado fonte. Como descritivo do procedimento utilizado, podemos usar a Regra 1 exposta na Figura 30.

Figura 30 Regras estabelecidas para as funções de entrada.

```

97 Temp_1->addFuzzySet(Res_temp_6);
98 FuzzySet* Res_temp_7 = new FuzzySet(46, 48, 50, 52);
99 Temp_1->addFuzzySet(Res_temp_7);
100
101 fuzzy->addFuzzyOutput(Temp_1);
102
103 // Regra 1.
104 FuzzyRuleAntecedent* Tensao_lcrit_infAndCarregamento_lcarr_bai = new FuzzyRuleAntecedent();
105 Tensao_lcrit_infAndCarregamento_lcarr_bai->joinWithAND(crit_inf, carr_bai);
106
107 FuzzyRuleConsequent* thenTemp_1Res_temp_3 = new FuzzyRuleConsequent();
108 thenTemp_1Res_temp_3->addOutput(Res_temp_3);
109
110 FuzzyRule* fuzzyRule1 = new FuzzyRule(1, Tensao_lcrit_infAndCarregamento_lcarr_bai, thenTemp_1Res_temp_3);
111 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule1);
112
113 // Regra 2.
114 FuzzyRuleAntecedent* Tensao_lcrit_infAndCarregamento_lcarr_med = new FuzzyRuleAntecedent();
115 Tensao_lcrit_infAndCarregamento_lcarr_med->joinWithAND(crit_inf, carr_med);
116
117 FuzzyRuleConsequent* thenTemp_1Res_temp_2 = new FuzzyRuleConsequent();
118 thenTemp_1Res_temp_2->addOutput(Res_temp_2);
119
120 FuzzyRule* fuzzyRule2 = new FuzzyRule(2, Tensao_lcrit_infAndCarregamento_lcarr_med, thenTemp_1Res_temp_2);
121 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule2);

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido na plataforma de programação do Arduino Uno.

O procedimento inicia com a denominação da regra antecedente, a qual depois é gravada utilizando o comando `new FuzzyRuleAntecedent()`. Na linha seguinte é necessário chamar a função criada e utilizar o comando “`joinWithAND`” com parâmetros oriundos da montagem das funções de entrada. Esse comando tem o objetivo de unificar as funções de entrada e estabelecer uma condição obrigatória de avaliação de um parâmetro em conjunto com o outro. Em seguida é necessário criar a regra consequente com procedimento semelhante ao anterior. Essa função tem o objetivo de conectar a função antecedente criada com o resultado esperado da lógica fuzzy. Para tanto é necessário utilizar o comando “`addOutput`” com a entrada do parâmetro das funções de saída declaradas. O próximo passo consiste em declarar a regra utilizando o comando “`new FuzzyRule`” o qual possui parâmetros que relacionam o índice da regra, a regra antecedente e a regra consequente. Por fim, utiliza-se a função “`addFuzzyRule`” com um parâmetro novo com objetivo de montar a regra como um todo. O mesmo procedimento é realizado para as regras seguintes de acordo com as combinações das funções de entrada e respostas de temporização esperadas. Desta forma, não é necessário descrever as declarações das regras seguintes.

A função `loop()` contém toda a lógica de programação do algoritmo, a qual funciona como uma tarefa única. Inicialmente, o algoritmo de controle foi separado em diferentes tarefas. Porém, como não houve ganho significativo optou-se por simplificar o código trabalhando como uma única tarefa em tempo real. Como o caráter da aplicação é tempo real do tipo não crítico, entende-se que essa decisão não afete o desempenho do controle, bem

como a estabilidade do sistema como um todo. Cabe ressaltar que o Módulo Fuzzy calcula somente o parâmetro de temporização.

Dentro desta função é necessário declarar os comandos para estabelecer a alocação dos registradores Modbus, que no caso foram utilizados 10. Em número de dados úteis, esse número se transforma no tráfego de 5 variáveis.

Uma vez que os registradores estão alocados, é necessário estabelecer as variáveis que vão utilizar os registradores Modbus. Como apresenta a Figura 31, a partir da linha 263, o registrador número 1 é usado para armazenar as leituras de tensão do lado fonte enquanto que o registrador número 3 armazena as leituras das variações de carga.

Em seguida esses valores são usados como entradas nas funções da lógica fuzzy, usando o comando “setInput” com parâmetros do índice da função de entrada e o parâmetro de entrada, propriamente dito. A linha 272 apresenta o comando “fuzzify()” sem parâmetros, responsável pela defuzzyficação do resultado ,ou seja decodificar o resultado do cálculo de áreas da lógica fuzzy em um valor esperado de temporização. O valor de temporização é dado variável “output1” a qual é transformada na variável “Temp_1_fuzzy” que é utilizada para enviar o parâmetro temporização calculado para o Módulo de Controle.

Por fim, os valores calculados para a temporização, são enviados para o Módulo de Controle utilizando o registrador número 8.

Figura 31 Rotina de cálculo do parâmetro temporização.

```

253 void loop()
254 {
255
256   while(1)
257   {
258     /*Atualização do Modbus. Aumentei o número de registradores pois
259     modbusino_slave.loop(tab_reg, 10);
260
261
262     /* Obtenção da tensão média horária.*/
263     Med_Tenfon_1_min_fuzzy = tab_reg[1];
264
265     /*Obtenção da diferença da potência aparente.*/
266     dP = tab_reg[3];
267
268
269
270     fuzzy->setInput(1, Med_Tenfon_1_min_fuzzy);
271     fuzzy->setInput(2, dP);
272     fuzzy->fuzzify();
273     float output1 = fuzzy->defuzzify(1);
274     Temp_1_fuzzy = (uint32_t) output1;
275
276     /*Passando os valores de temporização para os registradores.*/
277     tab_reg[4] = Med_Tenfon_1_min_fuzzy;
278     tab_reg[4] = dP;
279     tab_reg[8] = Temp_1_fuzzy;

```

Já no Módulo de Controle, o resultado da temporização pode ser lido e enviado para o regulador de tensão utilizando os procedimentos de comunicação apresentados na sessão 4.1. A Figura 32 apresenta o valor calculado da temporização no Módulo de Controle.

Figura 32 Atualização do parâmetro temporização no Módulo de Controle.

TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Uref_1_Pto0	135200	18:51:33	✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Uref_FI_Pto1	138000.0	18:51:33	✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Insens_Pto2	300.0	18:51:33	✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Insens_FI_Pto3	300.0	18:51:33	✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Temp_FN_Pto4	480.0	18:51:33	✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Temp_FI_Pto5	300.0	18:51:33	✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Ur_Pto6	0	ago 07 19:50	✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Ur_FI_Pto7	(n/a)		✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Ux_FN_Pto8	0.0	18:49:33	✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Ux_FI_Pto9	(n/a)		✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Limit_Min_Pto10	(n/a)		✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Limit_Max_Pto11	(n/a)		✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_lmax_Pto12	(n/a)		✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Bloq_Min_Pto15	(n/a)		✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Fluxo_Pto13	(n/a)		✓	🔄	⚙️
TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Bloq_Max_Pto14	(n/a)		✓	🔄	⚙️
Modulo_Fuzzy - dP_1	2.462129703388443	18:51:33	✓	🔄	⚙️
Modulo_Fuzzy - val_dP	2.0	18:51:33	✓	🔄	⚙️
Modulo_Fuzzy - Tensao_1	13363.0	18:51:33	✓	🔄	⚙️
Modulo_Fuzzy - val_Tensao	13374.0	18:51:33	✓	🔄	⚙️
Modulo_Fuzzy - temp_1	48.0	18:51:33	✓	🔄	⚙️

From 2018 Aug 11 16:50 Inception Excel

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.3 Implementação do algoritmo de ajuste no Módulo de Controle

O cálculo dos parâmetros U_r , U_x , U_{ref} são realizados dentro do Módulo de Controle em um ambiente de Javascript. A base técnica de cálculo considera a metodologia demonstrada no Capítulo 3. Cada parâmetro possui um *script* de cálculo individualizado de forma a reduzir riscos de falhas que afetem simultaneamente o cálculo de todos os parâmetros. Essa é uma estratégia de abordagem para um sistema de tempo real do tipo não crítico. A Figura 33 apresenta o cálculo do parâmetro U_r .

Inicialmente é realizada a declaração das variáveis utilizadas para determinar o parâmetro de cálculo seguindo a metodologia, entre as linhas 10 e 15. Os valores do fator de potência e Seno do ângulo são os obtidos no ponto de carregamento máximo da curva horária, utilizando como critério o maior valor de corrente média obtida. Os valores de RTP, Corrente Nominal, Tensão Máxima e Mínima são entradas manuais de acordo com a faixa de tensão, zona de TAP e parâmetros do regulador de tensão.

Figura 33 Declaração de variáveis para o cálculo do parâmetro Ur.

1	Point name	Data type	Var
2	Meta_Mestrado_dados - Pati_1	Numeric	Pati_1
3	Meta_Mestrado_dados - Prea_1	Numeric	Prea_1
4	TAP_ELETRO_RUA - RG2_Vcarga_Ptol3	Numeric	Tcar_1
5	Meta_Mestrado_dados - I_1	Numeric	I
6	Meta_Mestrado_dados - FP_1	Numeric	FP_1
7			
8	-----		
9			
10	var I_1;		
11	var Imax_1; // corrente máxima		
12	var tImax_1; // instante de tempo da corrente máxima		
13	var Imin_1; // corrente mínima		
14	var tImin_1; // instante de tempo da corrente mínima		
15	var FPmax_1;		
16			
17	/*Variáveis do RT.*/		
18	var Upmax_1 = 14350;		
19	var Upmin_1 = 13520;		
20	var Ic_1 = 200;		
21	var RTP_1 = 120;		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido em Javascript.

Figura 34 Cálculo do parâmetro Ur.

```

24 /*Defasagem de 7 dias da semana.*/
25 /*O periodStartTime é usado para iniciar a leitura a 7 dias atrás.*/
26 starttime=I.past(DAY,1).periodStartTime-(7*24*3600*1000);
27 /*O periodEndTime é usado para terminar a leitura a 7 dias atrás.*/
28 endtime=I.past(DAY,1).periodEndTime-(7*24*3600*1000);
29
30 /*Condição para calcular os parâmetros caso não tenham valores de leituras sufici
31 if (I.getStats(starttime,endtime).maximumTime=='-1')
32 {
33     starttime=I.past(DAY,1).periodStartTime-(0*24*3600*1000);
34     endtime=I.past(DAY,1).periodEndTime-(0*24*3600*1000);
35 }
36
37 //corrente máxima do período considerado entre starttime e endtime
38 Imax_1=I.getStats(starttime,endtime).maximumValue;
39 tImax_1=I.getStats(starttime,endtime).maximumTime;
40
41 /*if (Imax_1>Ic_1)
42 {
43     Imax_1=Ic_1;
44 }*/
45
46 //corrente mínima do período considerado entre starttime e endtime
47 Imin_1=I.getStats(starttime,endtime).minimumValue;
48 tImin_1=I.getStats(starttime,endtime).minimumTime;
49
50 /*Valor do FP no ponto de carregamento máximo*/
51 FPmax_1 = FP_1.pointValueBefore(tImax_1).value;
52 Ur_1 = ((Upmax_1 - Upmin_1)/RTP_1)*(Ic_1/Imax_1)*(FPmax_1);
53
54 return Ur_1;

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido em Javascript.

As sentenças “starttime” e “endtime” são utilizadas para declarar o período de tempo em que os valores de corrente máxima serão referenciados. Neste caso, se considera sempre o mesmo dia da semana com defasagem de 7 dias. Caso não haja dados de cálculo na memória do módulo de controle referentes a 7 dias atrás, calcula-se os parâmetros com base nos dados do dia presente. Caso necessário, uma lógica condicionante verifica esse caso alterando o período. Em seguida, obtém-se o valor máximo de corrente referente a 7 dias atrás usando a função “getStats.maximumValue” com os parâmetros de tempo. Uma vez calculada a corrente máxima, é utilizado a função “getStats.maximumTime” visando obter o instante de corrente máxima, que será utilizada para obter o fator de potência no mesmo instante. O algoritmo conta com um limitador de corrente para não considerar leituras em momentos de curto circuito. Nesse caso, o valor da corrente lido é substituído pelo valor da corrente nominal do regulador de tensão com vistas a calcular os parâmetros dentro dos limites normais de operação. A função “pointValueBefore.value” usa o parâmetro tempo e devolve o resultado. Por fim, o parâmetro U_r é calculado usando a equação relacionada no Capítulo 3 deste trabalho.

Os parâmetros U_{ref} e U_x seguem a mesma lógica de obtenção de dados e algoritmo de cálculo. As diferenças principais estão nas equações utilizadas, de acordo com o Capítulo 3 deste trabalho. Sendo assim, as Figuras 45 e 46 apresentam as partes finais dos algoritmos de cálculo desses parâmetros, onde ficam evidentes as principais diferenças.

Figura 35 Seleção específica do algoritmo de controle para apresentar o cálculo do parâmetro U_{ref}

```

36
37 //corrente mínima do período considerado entre starttime e endtime
38 Imin_l=I.getStats(starttime,endtime).minimumValue;
39 tImin_l=I.getStats(starttime,endtime).minimumTime;
40
41 /*Valor do FP no ponto de carregamento máximo*/
42 FPmax_l = FP_l.pointValueBefore(tImax_l).value;
43 Senomax_l = Seno_l.pointValueBefore(tImax_l).value;
44 Uref_l = (Upmax_l - (RTP_l*Imax_l*((Ur_l.value*FPmax_l)+(Ux_l.value*Senomax_l)))/Ic_l)/RTP_l;
45
46 return Uref_l;

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido em Javascript.

Figura 36 Seleção específica do algoritmo de controle para apresentar o cálculo do parâmetro U_x

```

36
37 //corrente mínima do período considerado entre starttime e endtime
38 Imin_l=I.getStats(starttime,endtime).minimumValue;
39 tImin_l=I.getStats(starttime,endtime).minimumTime;
40
41 /*Valor do FP no ponto de carregamento máximo*/
42 Senomax_l = Seno_l.pointValueBefore(tImax_l).value;
43 Ux_l = ((Upmax_l - Upmin_l)/RTP_l)*(Ic_l/Imax_l)*(Senomax_l);
44
45 return Ux_l;

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido em Javascript.

Os parâmetros calculados são enviados ao regulador de tensão na medida em que são calculados e armazenados no supervisor do Módulo de Controle.

4.4 Integração com o Controle do Regulador de Tensão

Para o estudo de caso, na fase inicial deste trabalho, o controle de regulador de tensão utilizado será o modelo desenvolvido pela empresa TapEletro. Este equipamento está disponível no Laboratório de Prototipação e Sistemas Embarcados (LAPSE). A Figura 37 apresenta o controle utilizado.

Figura 37 Controlador do regulador de tensão utilizado no desenvolvimento do trabalho.



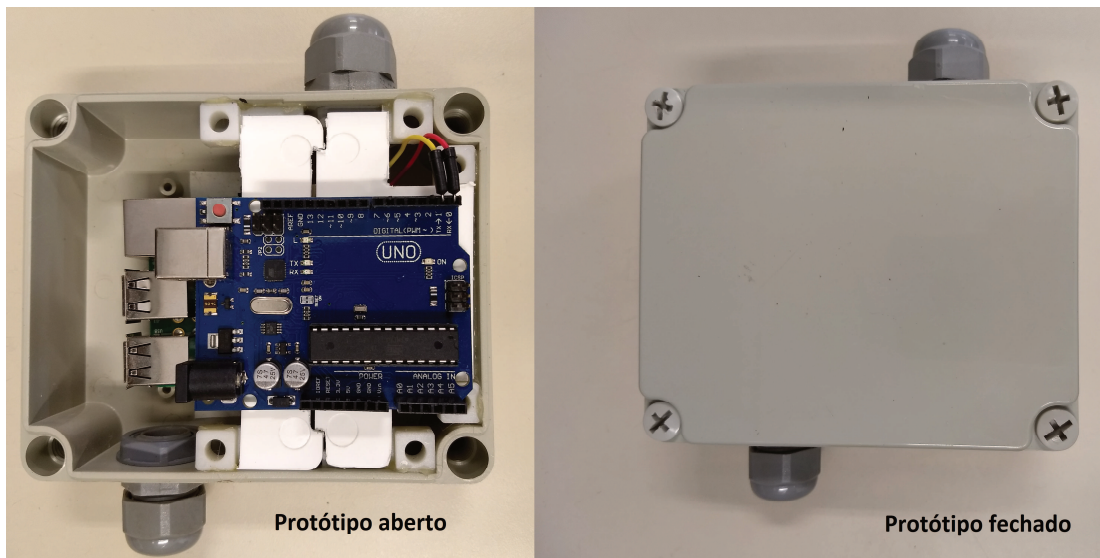
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A fim de avaliar as funções do protocolo, leitura e escrita dos parâmetros no regulador, uma série de testes simulando a estrutura ponto a ponto e hierárquica devem ser realizados. Para tanto, será realizada a implantação das curvas de carga e tensão, obtidas a partir do fluxo de potência calculado pelas ferramentas PSL DMS, em um circuito simulador, para a conexão no regulador de tensão. A partir deste poderão ser gerados cenários de teste para avaliação do algoritmo de controle local. Essa operação é realizada monitorando os dados da memória do RT, gerando as curvas de carga de referência e armazenando os ajustes calculados, uma vez que o controle será também monitorado pelo sistema supervisor. Integrando as ferramentas de cálculo de fluxo ao circuito simulador, pode-se partir para etapa de coleta dos dados do RT e tratamento dos mesmos. Nessa etapa são criadas as curvas de carga (P, e Q), corrente, fator

de potência e de tensão e estabelecimento dos limites de TAP baseado na operação do equipamento.

A aquisição desses dados é realizada pelo Módulo de Controle com amostragem a cada 5 segundos. Os dados coletados são armazenados de acordo com a data e horário, para atualização da curva de carga, garantindo sempre um perfil atualizado do ponto de monitoramento. Essa curva foi construída com um período de 24 h baseando, inicialmente, nas amostras das coletas de dados. Os resultados das curvas são armazenados no Módulo de Controle, uma vez que, o perfil das curvas será utilizado para calcular os parâmetros. O Módulo Fuzzy recebe as entradas necessárias para calcular a temporização, com atualização do parâmetro conforme configurado no Módulo de Controle. A Figura 38 apresenta o protótipo desenvolvido conectado ao controlador do regulador de tensão e circuito simulador.

Figura 38 Protótipo do controle dinâmico inteligente de tensão.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Foram realizados testes de comunicação serial entre o regulador de tensão e o Módulo de Controle, utilizando o protocolo DNP3, a fim de avaliar a integridade da comunicação. Nesta etapa foi configurado um driver DNP3, no sistema Mango Automation, parametrizando endereços das variáveis de operação da fase 2 do regulador de tensão obedecendo a configuração do equipamento. Um exemplo de uma variável configurada no supervisor Mango Automation está presente na Figura 39.

Figura 39 Configuração da variável tensão do lado carga no supervisor Mango Automation.

The screenshot displays the configuration page for a device named 'Regulador'. The page is divided into sections: 'Current alarms' and 'Runtime status'. Below these, there are tabs for 'Data Source', 'Data points', and 'Point details'. The 'Point details' tab is active, showing the following configuration fields:

Device Name	Regulador
Name	RG2_VCarga_Pto13
Export ID (XID)	DP_189c4d11-9c2e-4acd-98cf-7
Read permission	superadmin
Set permission	superadmin
Adicionar vários data points	<input type="checkbox"/>
Índice Mínimo	
Índice Máximo	
Índice	13
Tipo do dado	ANALOG INPUT

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido na plataforma Mango Automation.

Depois de configurar as variáveis de entrada em protocolo DNP3, é necessário configurar os registradores de leitura e escrita em protocolo Modbus para permitir a comunicação com o Módulo Fuzzy. Como o protocolo Modbus trabalha com variáveis do tipo inteiro de tamanho 2 bytes e as entradas analógicas do DNP3 são do tipo ponto flutuante de 4 bytes, foi necessário utilizar 2 registradores Modbus por variável de entrada. Todos os registradores do Modbus foram configurados no modo ajustável, possibilitando a escrita de valores tanto das variáveis de entrada como dos resultados do cálculo da temporização. A Figura 40 apresenta a configuração da variável tensão lado fonte em protocolo ModBus.

Figura 40 Configuração em Modbus do registrador 8 para a medição da tensão lado fonte.

The screenshot displays the 'Point details' configuration page for a Modbus device. The page is titled 'Point details' and includes a sub-header 'Point details'. The configuration fields are as follows:

Field	Value
Device Name	ArduinoFelpe
Name	Atmel_VFonte_Pto8
Export ID (XID)	DP_cc8b8a28-87f3-4d33-9f2e-7c
Read permission	superadmin
Set permission	superadmin
Slave id	1
Register range	Holding register
Modbus data type	4 byte float
Multistate numeric	<input type="checkbox"/>
Offset (0-based)	8
Bit	0
Number of registers	0
Character encoding	ASCII
Write type	Settable
Multiplier	1
Additive	0

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido na plataforma Mango Automation.

Ainda no supervisório é necessário configurar conexões entre as variáveis de leitura em protocolo DNP3 e disponibilizar em registradores de protocolo Modbus. Esses registradores armazenam os valores inteiros, possibilitam a leitura e escrita pelo algoritmo de controle implementado no Módulo Fuzzy. Essa limitação reduz a precisão dos cálculos, pois não possibilita a comunicação de valores de decimais. No entanto, como a ordem de grandeza das variáveis de operação é elevada, entende-se que a perda de precisão de cálculo de números decimais não impactará de forma significativa na aplicação do controle. A conexão entre as variáveis em protocolo DNP3 e Modbus é realizada através do uso de “*Point links*” (Figura 41).

Figura 41 Conexão entre pontos do protocolo DNP3 e ModBus da variável tensão lado fonte.

Detalhes de point link

Export ID (XID)

Script data source permission ↓

Script data point read permission ↓ ↻

Script data point set permission ↓

Data point de origem ↓

Data point de destino ↓

Script ↻

```

1 //a = source.value;
2 //a = 5;
3 //b = a.toString();
4 //c= parseInt(b);
5 return source.value;

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido na plataforma Mango Automation.

O Quadro 7 apresenta o resumo dos pontos configurados em ambos protocolos para testar a comunicação entre dispositivos.

Quadro 7 Coerência entre pontos nos protocolos ModBus e DNP3.

Variável do regulador de tensão	Configuração DNP3		Configuração Modbus	
	Tipo de variável	Ponto		Tipo de variável
Corrente lado carga (I)	Entrada analógica	14	Tab_reg[6]	Ponto flutuante de 4 bytes
Tensão do lado fonte (V)	Entrada analógica	15	Tab_reg[8]	Ponto flutuante de 4 bytes
Ângulo (°)	Entrada analógica	24	Tab_reg[4]	Ponto flutuante de 4 bytes
Potência ativa (kW)	Entrada analógica	29	Tab_reg[0]	Ponto flutuante de 4 bytes
Potência reativa (kW)	Entrada analógica	30	Tab_reg[2]	Ponto flutuante de 4 bytes
Ponto de verificação de mensagens	Entrada analógica	x	Tab_reg[18]	Ponto flutuante de 4 bytes

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O passo seguinte consiste em testar a comunicação entre o regulador de tensão, o Módulo de Controle e o algoritmo implementado no Módulo Fuzzy. Nesta fase, os seguintes passos foram executados de forma sequencial:

- Leitura da tensão do lado fonte do regulador de tensão em protocolo DNP3;
- Visualização dos dados no supervisório Mango Automation;
- Armazenamento no registrador 8 Modbus;
- Transferência do mesmo valor para o registrador de testes número 18 dentro do Módulo Fuzzy.
- Reenvio dos dados para validação no supervisório Mango Automation.

Os resultados da comunicação entre os dispositivos regulador de tensão, módulos de controle e fuzzy foi adequada, como mostra o exemplo da Figura 42.

Figura 42 Comunicação circular entre dispositivos da variável tensão lado fonte.

Filter by user (unnamed)		
1_Vcarga_Pto9	14280	09:07:38
1_kV_Pto11	14280.0	09:07:38
2_VCarga_Pto13	15180	09:07:38
Atmel_VFonte_Pto8	15180.0	09:07:39
Registrador 18 para testes	15168.0	09:07:39
Atmel_Angulo_Pto4	50.599998474121094	09:07:39
Atmel_Icarga_Pto6	286.41510009765625	09:07:39
Atmel_Pot_Reativa_Pto2	2168.571533203125	09:07:39

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido na plataforma Mango Automation.

O mesmo teste foi repetido para todas as variáveis de operação, como mostra o Quadro 8. O erro calculado utiliza como base a variável de entrada do Módulo Fuzzy obtendo um resultado absoluto da diferença percentual. Nestes cálculos foram consideradas as variáveis do regulador de tensão enviadas para o Módulo Fuzzy e escritas de volta no módulo de controle apresentando erro inferior a 1%. Esse valor foi considerado satisfatório para a aplicação.

Quadro 8 Teste de comunicação entre os dispositivos e protocolos.

Variável do regulador de tensão	Configuração da variável de entrada no Módulo Fuzzy		Configuração da variável de envio para o Módulo de Controle		Erro
	Registrador	Leitura	Registrador	Leitura	%
Corrente lado carga (I)	Tab_reg[6]	285.47	Tab_reg[18]	284	0.51
Tensão do lado fonte (V)	Tab_reg[8]	15130.33	Tab_reg[18]	15104	0.17
Ângulo (°)	Tab_reg[4]	50.40	Tab_reg[18]	50	0.30
Potência ativa (kW)	Tab_reg[0]	5030.33	Tab_reg[18]	5024	0.13
Potência reativa (kVAr)	Tab_reg[2]	2155.71	Tab_reg[18]	2144	0.54

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O elo final do teste de comunicação consiste na escrita de algum valor calculado no Módulo Fuzzy na memória do regulador de tensão. Para realizar a escrita de valores na memória do regulador foi necessário configurar uma variável analógica de saída do regulador de tensão no supervisor Mango. Neste caso, utilizou-se o ponto do parâmetro temporização em fluxo direto do regulador de tensão. A Figura 43 apresenta a configuração.

Figura 43 Configuração do ponto de temporização no regulador de tensão.

The screenshot shows the 'Point details' configuration page in the Mango Automation web interface. The browser address bar indicates the URL is localhost:8080/data_sources.shtm. The configuration fields are as follows:

- Device Name: TAP_ELETRO_RUA
- Name: RG2_AN_OUT_Temp_FN_Pto4
- Export ID (XID): DP_265f9b09-b3e4-4ef6-b28c-5c
- Read permission: superadmin
- Set permission: superadmin
- Adicionar vários data points:
- Índice Mínimo:
- Índice Máximo:
- Índice: 4
- Tipo do dado: ANALOG OUTPUT
- Modo de operação: Select Before Operate

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido na plataforma Mango Automation.

Para a escrita do valor de temporização calculado na memória do regulador de tensão foi necessário associar a variável de destino, como o endereço do parâmetro do regulador e a variável de origem como a temporização. A Figura 44 apresenta a configuração do ponto. Todas as variáveis escritas na memória do regulador de tensão requerem o comando “target.set(source.value)”, o qual tem a função de escrever o valor do ponto de origem no destino. Essa lógica se aplica a todos os pontos que requerem escrita no regulador de tensão.

Figura 44 Configuração do point link para escrever o parâmetro temporização no controlador do regulador de tensão.

The screenshot shows the 'Detalhes de point link' configuration page. The configuration fields are as follows:

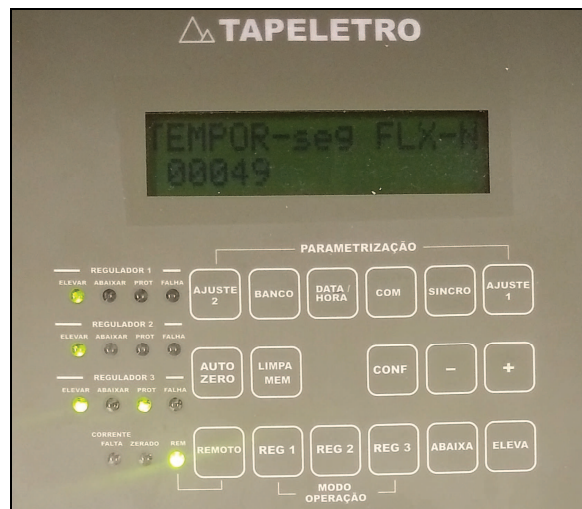
- Export ID (XID): PL_094203c8-aec9-4db5-8
- Script data source permission: superadmin
- Script data point read permission: superadmin
- Script data point set permission: superadmin
- Data point de origem: Modulo_Fuzzy - temp_1
- Data point de destino: TAP_ELETRO_RUA - RG2_AN_OUT_Temp_F
- Script:


```
1 target.set(source.value);
2 return source.value;
```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido na plataforma Mango Automation.

Realizados todos os testes, a conferência final da comunicação é realizada visualizando o valor calculado no visor do regulador de tensão, como mostra a Figura 45. A leitura correta no visor mostra o sucesso da comunicação.

Figura 45 Leitura do parâmetro temporização calculado e lido no visor do controlador do regulador de tensão.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Com isso, fecha-se o ciclo de comunicação entre o regulador de tensão, Módulo de Controle e Módulo Fuzzy mostrando a viabilidade do conceito desenvolvimento. Finalizada essa etapa, o foco passa para a implementação dos algoritmos de controle dos parâmetros do regulador de tensão viabilizando a função de auto ajuste de seus parâmetros.

4.5 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou o detalhamento da metodologia de comunicação e desenvolvimento do dispositivo de controle de tensão. Em suma, foi estabelecida a arquitetura de comunicação entre os módulos do protótipo de controle, premissas de parametrização do regulador e os testes de comunicação. Foi detalhada a estratégia de controle e implementação nos módulos Fuzzy e Controle, responsáveis pelo auto-ajuste do regulador de tensão.

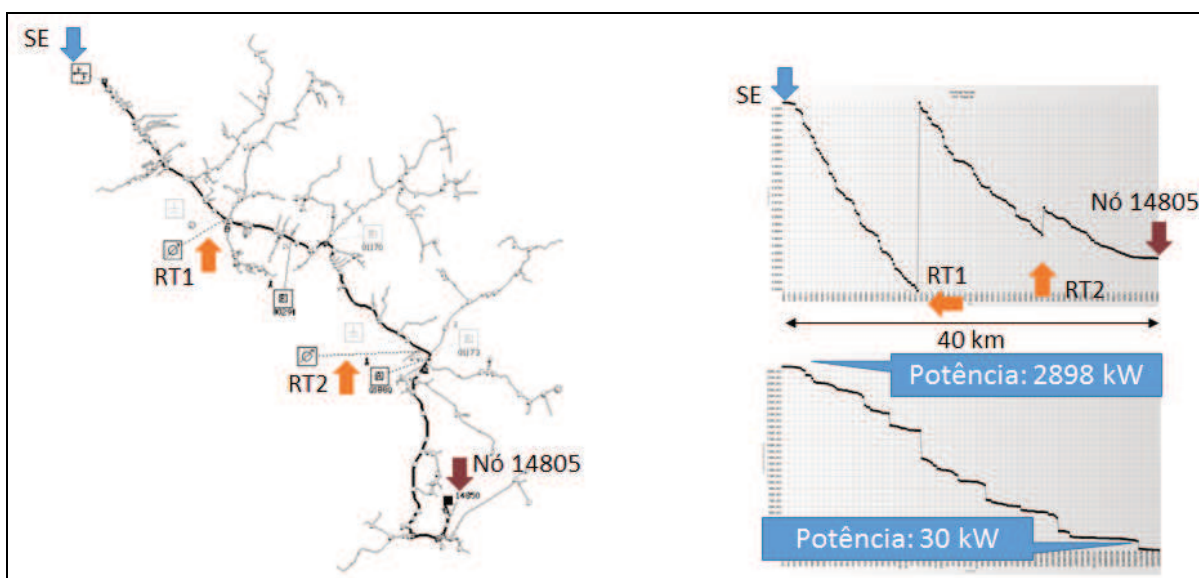
5 VALIDAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Estudo do caso base

A obtenção das curvas de carga e tensão para a realização dos testes de bancada será feita a partir dos cálculos de fluxo de potência, utilizando o programa PSL DMS. Um alimentador real chamado de PAL 14 143 é utilizado no estudo de caso do projeto de pesquisa. Estes valores serão alimentados no controle do regulador nas entradas correspondentes ao secundário do TP e do TC através do circuito simulador.

As principais características de carregamento, perfis de tensão e de potência do alimentador 143 ligado a subestação PAL14, bem como a topologia do mesmo são apresentadas na Figura 46. É também apresentada a localização dos reguladores de tensão do alimentador.

Figura 46 Alimentador de distribuição real e resultado do estudo de fluxo de potência.



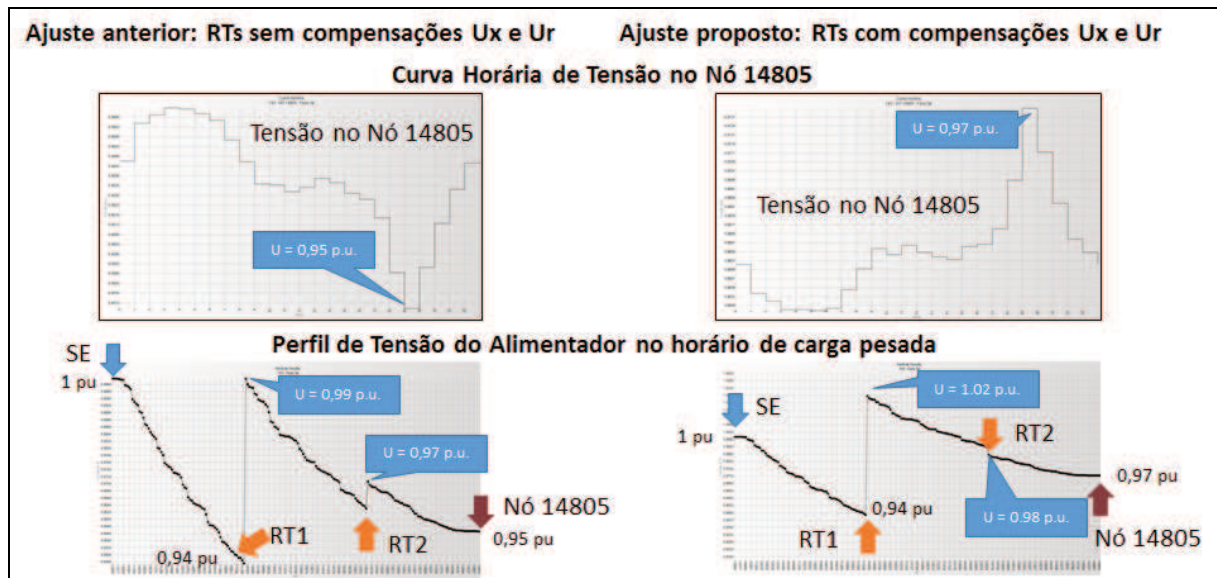
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Como referência inicial para avaliação do sistema de controle local, foi realizado um estudo baseado em simulação deste alimentador. Essa avaliação contemplou uma análise do fluxo de potência em dias úteis e finais de semana com os reguladores de tensão desligados e ligados com os parâmetros que estão configurados em campo. Esta fase teve o objetivo de diagnosticar as características de carregamento em carga leve, pesada e condições de qualidade da energia elétrica em regime permanente.

A partir disso, foi utilizada a metodologia de cálculo dos parâmetros de Tensão de Referência e Compensações de linha Ativa e Reativa de acordo com os fundamentos abordados no Capítulo 2 deste trabalho. Com isso foram aplicadas as curvas de potência ativa, reativa e tensão obtidas no fluxo como sendo a curva de referência. Foram também considerados as posições de TAP estudadas para os transformadores considerando os originais.

A partir dos novos parâmetros calculados foram realizadas novas simulações de fluxo de carga para comparar com o desempenho dos cenários de reguladores de tensão com os ajustes iniciais e a aplicação dos novos parâmetros calculados. Os novos ajustes consideram a compensações de queda de linha. Os gráficos da Figura 47 mostram os principais resultados.

Figura 47 Comparativo entre ajuste anterior e ajuste proposto.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

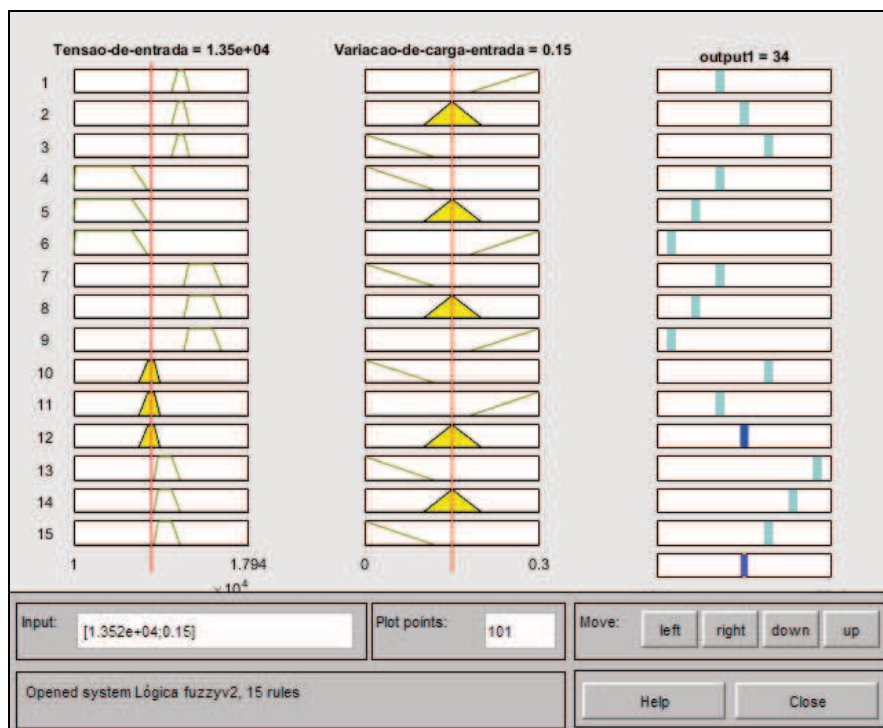
Nota-se um aumento da compensação de tensão no horário de carga pesada no ponto mais distante do alimentador, demonstrando que o aumento da compensação ocorre com o aumento da corrente de carga.

A simulação demonstrou que o controle de tensão em regime permanente tanto em cargas baixas e altas é mais efetivo quando se utiliza a metodologia de cálculo dos parâmetros com base no carregamento do alimentador. Dito isso, justifica-se implementar o ajuste dinâmico dos parâmetros em reguladores de tensão, uma vez que, a eficácia do controle de tensão é fortemente impactada pelas mudanças do perfil de carga dos alimentadores.

5.2 Validação do parâmetro temporização calculado pelo Módulo Fuzzy

O algoritmo de cálculo da temporização no Módulo Fuzzy é testado através da simulação das variáveis de entrada no ambiente de desenvolvimento do Matlab e comparado com os valores obtidos no algoritmo desenvolvido. O uso da plataforma Matlab se deve a possibilidade de alterar os valores de entrada visualizando de forma explícita os resultados da temporização de acordo com a contribuição de cada uma das variáveis de operação. A Figura 48 apresenta o simulador das regras do Matlab usado para verificar o algoritmo fuzzy.

Figura 48 Ambiente de simulação dos parâmetros de entrada da lógica fuzzy para calcular a temporização.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Desenvolvido no ambiente Matlab.

A análise consiste em simular cenários com diferentes combinações de tensões de entrada com características precárias, críticas e, adequadas e variações de carregamento do tipo baixo, médio e alto. Os mesmos parâmetros são usados no algoritmo de cálculo do Módulo Fuzzy contra os resultados simulados no ambiente do Matlab (Quadro 9).

A análise crítica dos resultados mostra que o cálculo da temporização no módulo Fuzzy está corretamente parametrizada, quando comparados aos valores calculados no Matlab. O erro calculado médio é inferior à 1% para todos os cenários. Os cenários 10, 11 e 12 foram os únicos que apresentaram erro superior à zero. Entende-se que o erro ocorreu, pois foram os únicos cenários em que a temporização calculada no ambiente do Matlab apresentou valores com precisão de uma casa decimal. Como os valores fornecidos pelo Módulo Fuzzy são inteiros, esse erro se deve ao arredondamento. A partir disso, entende-se que o erro obtido é aceitável para a aplicação desenvolvida.

Quadro 9 Análise crítica dos resultados calculados pelo Módulo Fuzzy.

Cenário de simulação	Tensão de entrada (V)	Variação de carga (%)	Temporização Resultado Matlab (s)	Resultado Algoritmo Módulo Fuzzy	Erro (%)
1	12420	4	28	28	0.00%
2	12420	15	22	22	0.00%
3	12420	30	16	16	0.00%
4	13248	4	38	38	0.00%
5	13248	15	32	32	0.00%
6	13248	30	26	26	0.00%
7	13524	4	40	40	0.00%
8	13524	15	34	34	0.00%
9	13524	30	28	28	0.00%
10	13800	4	44.9	45	0.22%
11	13800	15	42.2	42	0.47%
12	13800	30	36.2	36	0.55%
13	14076	4	52	52	0.00%
14	14076	15	46	46	0.00%
15	14076	30	40	40	0.00%
16	14628	4	45	45	0.00%
17	14628	15	39	39	0.00%
18	14628	30	33	33	0.00%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Desta forma, valida-se o algoritmo desenvolvido no Módulo Fuzzy para calcular o parâmetro de temporização da rede.

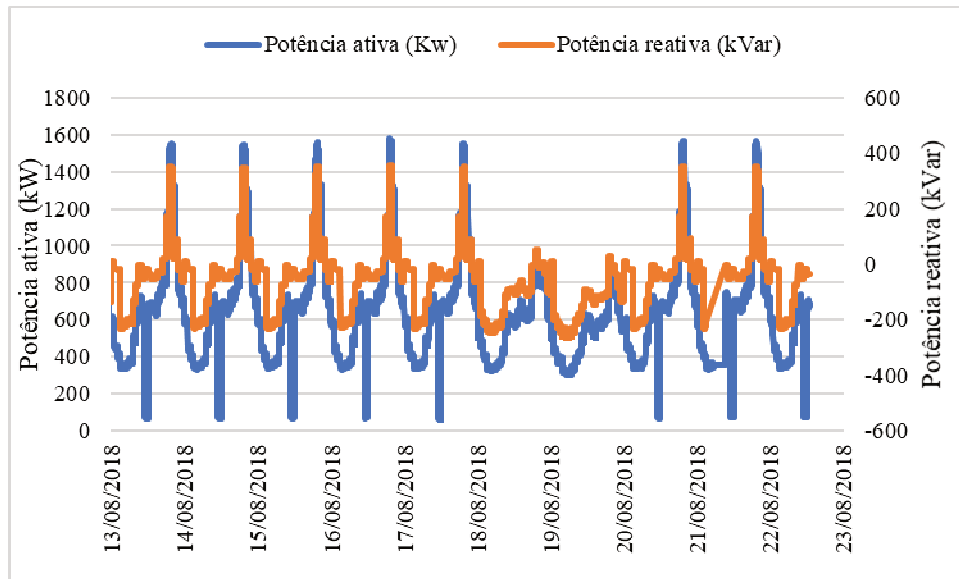
5.3 Estudo dos cenários de teste

A partir do circuito simulador foram gerados perfis de carga aplicados no regulador de tensão. O perfil simulado buscou uma aproximação da curva de carga do caso base, utilizando como referência o RT 2 do alimentador simulado. Com isso foram associadas variações em torno do ponto de operação devido a variação da tensão de alimentação do circuito.

Alguns degraus de tensão foram inseridos no sistema através da alteração dos TAPs do transformador de alimentação. Possibilitando uma simulação de variações causadas por equipamentos a montante do ponto em análise.

As simulações foram realizadas no período de 13/08/2018 até 21/08/2018 permitindo um acompanhamento do comportamento do dispositivo em dias úteis e finais de semana. A Figura 49 apresenta as curvas de potência ativa e reativa monitoradas pelo Módulo de Controle.

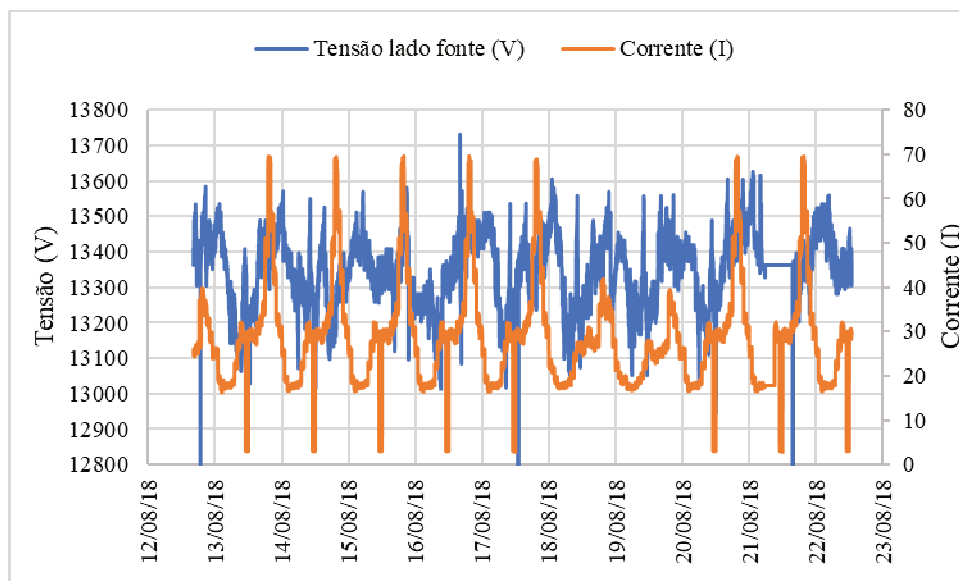
Figura 49 Valores de potência ativa e reativa coletados do regulador de tensão pelo Módulo de Controle.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Da mesma forma, a Figura 50 apresenta as curvas de tensão e corrente no mesmo período.

Figura 50 Valores de tensão e corrente coletados pelo módulo de controle.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nessas condições o regulador de tensão estava habilitado para a operação no modo remoto, recebendo os ajustes calculados pelo Módulo de controle e pelo Módulo Fuzzy. De acordo com o comportamento da curva de corrente e valores de potência ativa e reativa, calculam-se os valores de compensação resistiva e reativa no Módulo de Controle. Os resultados são comparados contra uma planilha que contém as equações paramétricas com base nas mesmas leituras de potência, ativa, reativa, corrente e tensão do lado fonte. O Quadro 10 apresenta os resultados obtidos no algoritmo com uma análise de erros.

Quadro 10 Comparação entre os parâmetros calculados no algoritmo desenvolvido contra os cálculos manuais considerando as mesmas variáveis.

	Cálculo dos parâmetros de forma explícita			Cálculos resultantes pelo Módulo de Controle			Erro médio (%)
	Uref	Ur	Ux	Uref	Ur	Ux	Parâmetros
12/08/2018	112,7	20,8	0,3	112,0	21,0	4,7	2,9%
13/08/2018	112,7	19,4	4,4	112,6	16,2	3,6	3,1%
17/08/2018	112,7	21,3	0,3	112,9	17,4	3,8	0,2%
20/08/2018	112,7	21,3	1,3	112,9	13,4	3,0	4,6%
21/08/2018	112,7	21,7	1,3	113,7	16,5	2,8	2,1%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Pode ser observado que o algoritmo de controle calcula os parâmetros com erro médio aproximado de 2,1%. Em tese, as equações utilizadas para calcular os parâmetros são as mesmas nas duas formas de cálculo. As principais hipóteses para os erros apresentados apontam para interrupções momentâneas de comunicação entre os dispositivos com falsas leituras de potência ativa, reativa e tensão gerando distorções em alguns casos. Sugere-se que possa haver uma diferença nas estampas de tempo identificadas para cálculo dos parâmetros. Isso porquê o algoritmo realiza a leitura da corrente máxima e a partir dela, identifica os patamares de carga máxima na curva de 24 h. O Quadro 11 apresenta um comparativo entre os valores de corrente máxima capturadas pelo algoritmo contra o valor calculado manualmente com base nas leituras de tensão, potência ativa e reativa.

Quadro 11 Comparativo entre os valores de tensão máximos calculados e obtidos pelo Módulo de Controle.

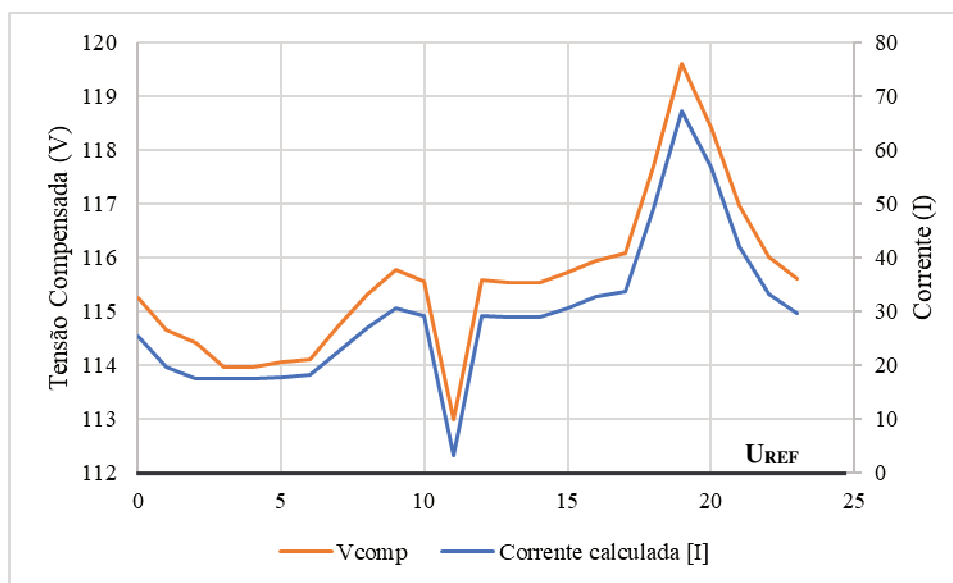
	Cálculo de I com base nas potências ativa, reativa e tensão	I máximo Módulo de Controle	Erro
12/08/2018	68,0	67,0	1,5%
13/08/2018	68,0	69,0	1,5%
14/08/2018	66,0	69,0	4,5%
15/08/2018	67,0	68,0	1,5%
16/08/2018	68,0	68,0	0,0%
17/08/2018	67,0	67,0	0,0%
18/08/2018	69,0	68,0	1,4%
19/08/2018	66,0	68,0	3,0%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Podem ser observados desvios em determinados cenários que podem estar sendo gerados por falhas momentâneas de comunicação. Cabe ressaltar que a aplicação desenvolvida é um protótipo para prova de conceito. Portanto, um dispositivo otimizado e fabricado para este fim tende a melhorar a estabilidade e confiabilidade, considerando que este dispositivo contará com exaustiva etapa de testes a fim de eliminar tais instabilidades.

Quanto ao cálculo dos parâmetros U_R , U_X e U_{REF} calculados pelo Módulo de Controle, é necessário avalia-los frente ao impacto na tensão no ponto de rede em questão. A partir desses valores, pode-se estimar a tensão compensada, ou seja, a tensão desejada no regulador de tensão. Como já foi demonstrado esse cálculo, utiliza a tensão de referência e a compensação dada pelos valores de U_R e U_X , acompanhando a variação da curva de corrente. Os parâmetros calculados pelo Módulo de Controle geram os benefícios esperados pelo controle na regulação de tensão por meio do aumento na tensão de acordo com o carregamento da rede, (Figura 51). Nota-se neste cenário, que a tensão compensada acompanhou o perfil da corrente de carga, apresentando valores mais elevados em horários de maior carregamento.

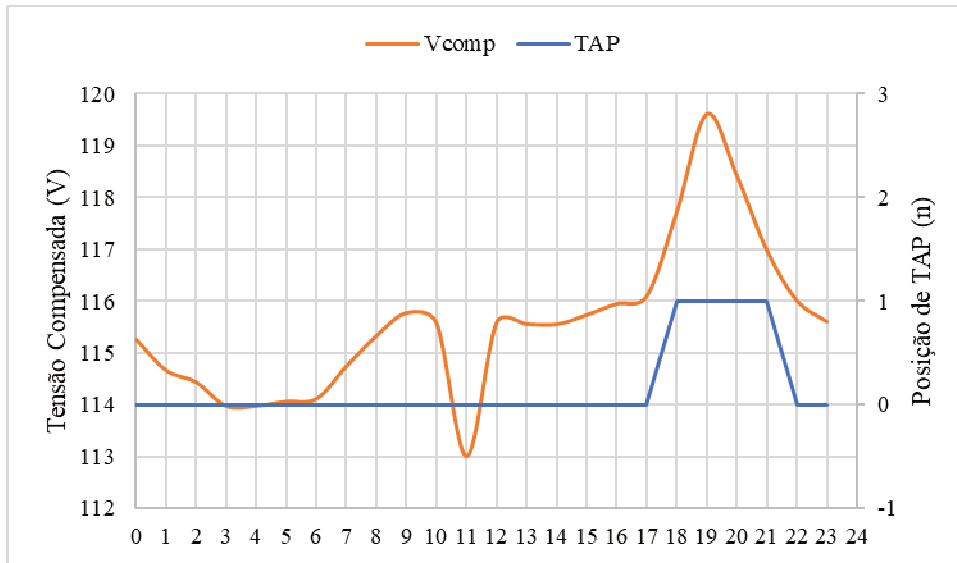
Figura 51 Ganho de tensão devido aos parâmetros U_r e U_x em função da variação da corrente.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O controle do regulador de tensão busca subir uma posição de TAP quando a tensão compensada é mais alta, a fim de atingir o valor objetivo do controle. Assim, os consumidores a jusante do ponto do regulador de tensão tendem a sofrer menos variações na tensão em situações de carregamento elevado. O inverso é verdadeiro, quando o carregamento é baixo, o controle praticamente elimina o ganho compensado, chegando ao valor da tensão de referência (Figura 52).

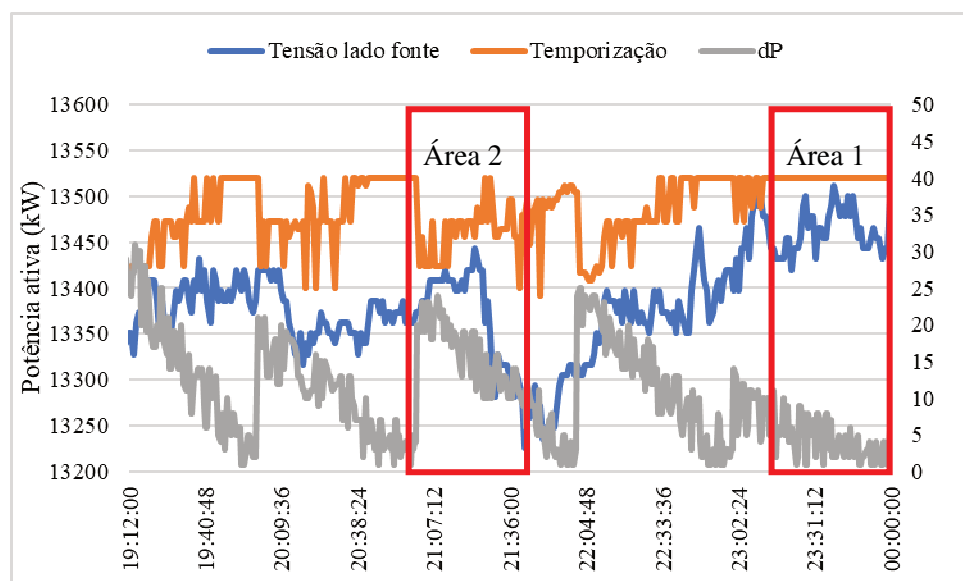
Figura 52 Comando de aumento de TAP segundo tensão compensada no patamar de carga elevada.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A temporização, calculada pelo Módulo Fuzzy, pode ser visualizada na Figura 53. A análise dos dados, indica que os tempos maiores de temporização estão ligados aos eventos de tensão próximo a faixa de tensão adequada e baixas variações da carga. Isso pode ser observado especialmente no dia 17/08/18 entre às 23:00 e 00:00 (Área 1). Nesse caso, o valor médio da temporização é de 44 s.

Figura 53 Temporização calculada pelo módulo fuzzy

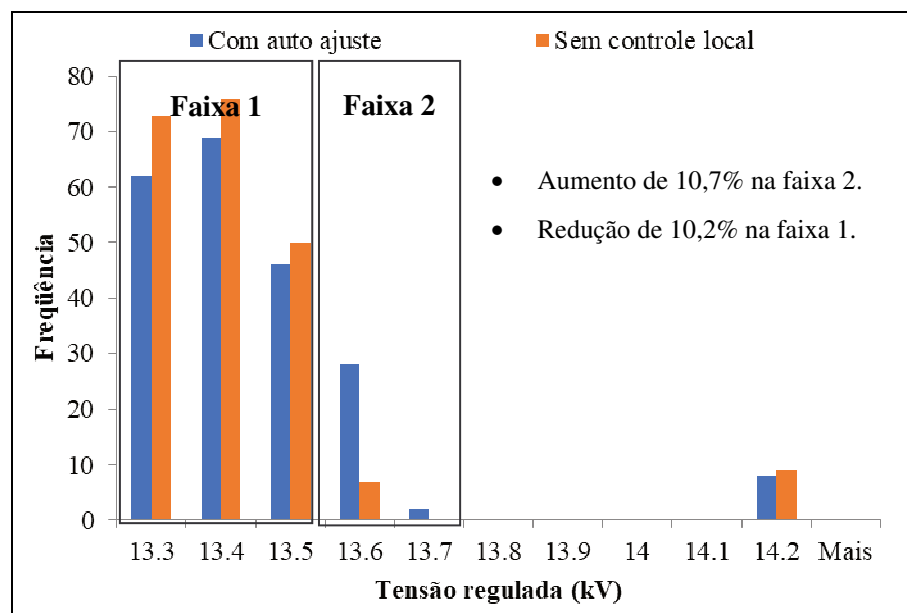


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O cenário oposto, ou seja, momentos em que a tensão se afastou da região de característica adequada com variações significativas de carga (Área 2), a temporização apresentou valores em média de 30 s. Esse resultado está de acordo com o comportamento esperado nessas situações. Em suma, com maiores variações de carregamento e tensão fora dos limites adequados, o controle trabalha com tempos de resposta mais rápidos. Nas situações mais estáveis de carga e tensão, o controle tende a ter resposta mais lenta, diminuindo o número de operações de TAP desnecessárias. Assim, entende-se que o valor da temporização calculado está coerente com a base de regras implementada.

A tensão regulada com o ajuste proposto pelo Módulo de Controle apresenta ganhos em termos de aderência a faixa adequada segundo os limites do Prodinst. A Figura 54 mostra que no período avaliado, a tensão se manteve mais próximo ao valor nominal de tensão segundo a zona de TAP especificada. Por um lado, a análise crítica mostra que tanto o cenário sem o auto ajuste como o contrário não houve violação dos limites do Prodinst. Por outro lado, a tensão resultante do auto ajuste compensou os horários de maior carregamento, demonstrando a eficácia do método. Além disso, essa análise se complementa a avaliação da Figura 51, onde fica claro que a tensão compensada acompanhou o perfil da carga, com maior valor nos momentos de carregamento elevado.

Figura 54 Comparativo da tensão regulado com e sem o controle inteligente.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Com base nos resultados obtidos, pode-se considerar o sistema adequado para a implementação em campo, uma vez que os níveis de tensão apresentaram melhoras significativas no regime permanente. Além disso, outro ganho obtido é que a temporização variável apresentou resultados coerentes possibilitando uma resposta mais rápida do controle quando necessário. Outra vantagem é que a tende a diminuir o número de operações de mudança de TAP desnecessárias reduzindo o desgaste dos equipamentos.

5.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foi apresentado o caso base utilizado para teste e validação do método desenvolvido para calcular os parâmetros de auto ajuste. Foram utilizados dados de um alimentador real com diferentes cenários para testar o comportamento do controle frente as alterações de perfil de carga. Com base nos testes realizados, o protótipo apresentou um comportamento satisfatório, uma vez que, os parâmetros foram calculados corretamente sem a necessidade de intervenção manual demonstrando a viabilidade da solução.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O controle de tensão no contexto das redes inteligentes tem relevante importância na qualidade da energia fornecida em regime permanente. Pode contribuir ativamente para a redução de compensações pelo serviço inadequado reduzindo o impacto financeiro para as distribuidoras. O cálculo inteligente dos parâmetros de tensão de referência, compensação ativa e reativa com base no carregamento diário de uma rede de distribuição melhora o perfil de tensão da mesma como foi demonstrado no estudo. Isso é verificado através da redução das oscilações de tensão em baixo e alto carregamento.

A arquitetura dos Módulos de Controle e Fuzzy foi eficaz, pois calculou os parâmetros de forma correta com envio dos parâmetros no instante devido gerando um melhor controle de tensão na rede do caso base. Mesmo no caso de regiões ou alimentadores com alterações bruscas no perfil da carga em diferentes períodos do ano, o método apresenta vantagens. Por exemplo, considerando regiões rurais, nos períodos de início e fim de safra, após o período inicial de aquisição de dados e atualização da curva de carga, o controle local apresentará um novo conjunto de ajustes. Portanto, isso torna o sistema mais eficiente do que com o ajuste convencional que deve ser realizado manualmente.

Um ponto de atenção encontra-se na definição dos valores para o caso de feriados uma vez que essa curva, em geral, se diferencia dos dias úteis. Neste caso, a solução proposta é utilizar como padrão, o último domingo armazenado na memória. A curva do domingo pode ser usada devido a semelhança de padrões de consumo com feriados. Para resolver isso, sugere-se a inclusão de uma variável que avalie a tendência da curva de carga, buscando o perfil mais adequado conforme os dados disponíveis da memória. Uma vez que, este problema tem pouca influência no resultado geral da proposta, sugere-se que seja tratado em trabalhos futuros. Caso não seja encontrado um perfil adequado, os parâmetros devem ser calculados conforme a curva em formação.

Os resultados globais desse trabalho mostram que o desenvolvimento de um controle dinâmico e inteligente para reguladores de tensão é viável e pode ser aplicado em redes de distribuição reais. Entende-se que esses resultados servem de fundamento para um estudo técnico-econômico de ampliação desta estrutura de controle dos reguladores de tensão de redes de distribuição.

6.1 Sugestão para Trabalhos Futuros

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram identificadas oportunidades de melhoria e continuidade dessa linha de pesquisa:

- Implementar o algoritmo de controle inteligente em uma única plataforma. Isso trará redução de custos, minimização de camadas de complexidade e maior compactação da solução;
- Avaliar o uso de outras técnicas de inteligência artificial nos algoritmos de controle. Dessa forma, pode-se obter soluções de maior precisão sobre o perfil de carga do ponto monitorado;
- Implementar técnicas de predição de grandezas elétricas para o desenvolvimento de um controle preditivo para ajuste dos parâmetros de controle do regulador de tensão.

Assim, os reguladores de tensão podem antecipar ações de controle de acordo com a tendência de mudança do perfil de carga. Para tanto, sugere-se avaliar técnicas preditivas tais como redes neurais, *machine learning*, entre outras.

REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, A. Y., OSAMA, R. A., ELKHODARY, S. M., & EL-SAADANY, E. F. **Reconfiguration of Distribution Systems with Distributed Generators using Ant Colony Optimization and Harmony Search Algorithms.** Electric Power System Research, vol. 75 (no. 2-3), pp. pp. 190-199, 2005.
- ABDELAZIZ, A. Y., MOHAMMED F. M., MEKHAMER S.F., BADR M. **Distribution systems reconfiguration using a modified particle swarm optimization algorithm.** Electric Power Systems Research, vol 79 pp. pp. 1521-1530, 2009.
- ABNT, **NBR11809 – Reguladores de Tensão**, 1992.
- ANEEL **Resolução ANEEL no 505/2001 Conformidade dos níveis de tensão (2009).** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/pesquisadigit.cfm>. Acesso em: 01 jan. 2017.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (2009)** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/82.htm>. Acesso em: 01 jan. 2017.
- ANEEL. **Decreto N° 5.163. [S.l.]: [s.n.]**, 2004.
- ARAÚJO, A. L. C., ARAÚJO, P.R.C., DANTAS, J. L., MARQUES, R. C. P., CRUZ, J. V., SILVEIRA, G. **Controle Eletrônico Para Reguladores de Tensão Indutivo Operando em Fluxo Inverso.** IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL. Araxá, MG, 2007.
- AREDES M., ENCARNAÇÃO L. F., M. JOÃO, DOS REIS, M. S. MONTEIRO, L. F. **Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Taps para a Compensação de Variações de Tensão de Curta Duração.** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/265916255>. Acesso em: 28 abr 2017.
- BAJAY, S. V; BADANHAN, L. F. **Energia no Brasil: os próximos dez anos. Sustentabilidade na Geração e uso de Energia**, 2002.
- BARAN, M., WU, F. F. **Network reconfiguration in distribution system for loss reduction and load balancing.** IEEE Transactions on Power Delivery, 4(2), pp. 1401- 1407, 1989.
- BARBOSA C. H. N. R. **Reconfiguração e Restauração Ótima de Sistemas de Distribuição Primária de Energia Elétrica** - Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte/MG: PPGEE/UFMG, 2012.
- BELL, R. **Introduction and Revision of IEC 61508.** In Advances in Systems Safety, org. Chris Dale e Tom Anderson, 273-291. Springer London, 2011.
- BERNARDON, D. P. **Novos métodos para reconfiguração das redes de distribuição a partir de algoritmos de tomadas de decisão multicriteriais.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

BERNARDON, D. P., V. J. GARCIA, M. S., DAZA, E. F., L. COMASSETTO, NOGUEIRA, E. **Operação automática de chaves telecomandadas para restabelecimento de energia elétrica.** XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI. São Paulo, SP, 2010.

BERNARDON, D. P., PFITSCHER, L. L., CANHA, L. N., DE MELLO, A. P. C., ABAIDE, A., D., SPERANDIO, M., GARCIA, V. J., RAMOS, M. J. S. **Sistemas de distribuição no contexto das redes elétricas inteligentes: Uma abordagem para reconfiguração de redes.** 1 Edição, Santa Maria, RS, 2015.

BOICEA, V. A. **Distribution grid reconfiguration through Simulated Annealing and Tabu Search.** The 10th international symposium on advanced topics in electrical engineering, Bucharest, Romania, 2017.

BOUHAFS, F., MACKAY, M., AND MERABTI, M. **Links to the future: Communication requirements and challenges in the smart grid.** Power and Energy Magazine, IEEE, 10(1):24–32, 2012.

BROWN, R. E. **Impact of smart grid on distribution system design.** In: Power and energy society general meeting - IEEE Conversion and delivery of electrical energy in the 21 ST Century, 2008, Pittsburgh. Anais... Pittsburg: IEEE, p.1-4, 2008;

BURNS, A. **Scheduling hard real-time systems: a review.** Software Engineering Journal, 1991.

BURNS, A., MCKAY, C.W. **A common portable execution environment for Ada** in Alvarez, A. (eD.) 'Ada: the design choice (Cambridge University Press, Madrid) pp. 80-89, 1989.

CAMPBELL, D. L. **How customer need focused the development of a new remote terminal unit line.** IEEE Computer Applications in Power, 1988.

CARRENO, E. M., ROMERO, R., PADILHA-FELTRIN, A. **An Efficient Codification to Solve Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Problem.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, pp. 1542-1551, 2008.

CAVALCANTE, P. L. **Advanced Network Reconfiguration System Applied to CEMIG-D System.** IEEE PES Conference On Innovative Smart Grid Technologies Latin America. São Paulo, 2013.

CHERKAOUI, R., BART, A., GERMOND, A. J. **Optimal configuration of electrical distribution networks using heuristic methods,** in 11th Power Systems Computation Conference - PSCC, Avignon, France, v. 1, pp.147-154, 1993.

CIVANLAR, S., GRAINGER, J., YIN, H., LEE S. **Distribution feeder reconfiguration for loss reduction.** IEEE Trans. Power Delivery, 3(3), pp. 1217-1223, 1988.

CURTIS, K. **A DNP3 Protocol Primer.** DNP Users Group. Retrieved from [https://www.dnp.org/AboutUs/DNP3 Primer Rev A.pdf](https://www.dnp.org/AboutUs/DNP3%20Primer%20Rev%20A.pdf), 2005.

DE ALBUQUERQUE, V. O. **Controle coordenado de tensão e potência reativa**, 2002.

DE MELLO, A. P. C. LONDERO, I. Z.R., BERNARDON, W. D., SPERANDIO, D. P., GARCIA, M., JACQUES, V. **Definição do Perfil de Tensão Ideal para Operação de Redes de Distribuição**, Cidel Argentina, 2010

DNP. **IEEE Standard for Electric Power Systems Communications – Distributed Network Protocol (DNP3)**. IEEE Std 1815-2010, pages 1–775, 2010.

DNP. **IEEE Standard for Electric Power Systems Communications- Distributed Network Protocol (DNP3)**. IEEE Std 1815-2012 (Revision of IEEE Std 1815-2010), pages 1–821, 2012.

DOS REIS, M. S. **Implementação de um regulador de tensão com comutador eletrônico de tap**. Tese de doutorado em engenharia elétrica na Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

DRIEMEIER, L. H. **Geração distribuída**. Tese de conclusão de curso em Engenharia Elétrica, 2009.

DUGAN, R.C., MCGRANAGHAN, M.F., SANTOSO, S., BEATY, H.W. **Electrical Power Systems Quality**, 2nd edition, McGraw Hill, New York, 2003.

DUNN, W.R. **Designing safety-critical computer systems**. Computer 36 (11) (novembro): 40 - 46, 2003.

ELETRONICS HUB. Disponível em: <http://www.electronicshub.org/microcontrollers/>. Acesso em: 09/02/2017

FAIZ, J., SIAHKOLAH, B. **Differences between conventional and electronic tap-changers and modifications of controller**, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, vol. 21, pp. 1342-1349, 2006;

FALCÃO, D.M. **Integração de tecnologias para viabilização da Smart Grid**. In: Simpósio brasileiro de sistemas elétricos, 3. (SBEE 2010), Belém, 2010. p. 1-5., 2010.

GUPTA, N., SWARNKAR, A., NIAZI, K. R. **A Modified Branch-Exchange Heuristic Algorithm for Large-Scale Distribution Networks Reconfiguration**. In: Power and Energy Society General Meetin 2012, San Diego. Anais... San Diego: IEEE, p.1-7, 2012.

HEYDT, G.T., BOSE, A., JEWELL, W.T., KEZUNOVIC, M., MCCALLEY, J.D., RAY, D.J., SAUER, P.W., SINGH, C., VITTAL V. **Professional Resources to Implement the Smart Grid**. In: Proceedings of the 2009 North American Power Symposium (NAPS), Mississippi, USA, Out. 2009.p. 1-8, 2009.

HSU, Y.Y., YI, J. H. **Planning of distribution feeder reconfiguration with protective device coordination**, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 8, Issue 3, pp 1340-1347, July 1993.

IBRAHIM, M., SALAMA M. M. A., **Smart distribution system volt / VAR control using distributed intelligence and wireless communication**, IET Gener. Transm. Distrib., vol. 9, no. August 2014, pp. 1–12, 2015.

IL-HYUNG LIM, M. S. C. J. **Intelligent Distributed Restoration by Multi-Agent System Concept in DAS**. 15th Int. Conf. Intelligent Systems Application to Power Systems (ISAP), 2009.

INSTITUTO ABRADÉE DE ENERGIA. **BP 3 Automação - Aspectos Tecnológicos e Premissas de Cálculo**. Workshop de Projeto Estratégico de P&D de redes elétricas inteligentes, Brasília, 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Technology roadmaps smart grids**. Paris, 2011a. Disponível em: <http://www.iea.org/papers/2011/smartgrids_roadmap.pdf>. Acesso em: nov. 2011.

IPAKCHI, A., ALBUYEH, F. **Grid of the future**. IEEE Power & Energy Magazine, v.7 n.2, p.52-62, 2009.

JEON, Y.J., KIM, J.C., KIM, J.O., SHIN, J.R. **An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Network Reconfiguration in Large-Scale Distribution Systems**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 17(4), 2002.

KERSTING, W. H. **The Modeling and Application of Step Voltage Regulators**. Milsoft Utility Solutions, IEEE, 2009.

LARSSON, T., INNANEN, R., NORSTROM, G., **Static Electronic Tap-Changer for Fast Phase Voltage Control**, 1997.

MELLO, A. P. C. **Reconfiguração de redes de distribuição considerando multivariáveis e geração distribuída**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

MELLO, A. P., SPERANDIO, M., PFITSCHER, L. L., & BERNARDON, D. P. **Planejamento da Reconfiguração Automática de Sistemas de Distribuição**. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA. Campina Grande / PB, 2012.

MELLO, A. P. C., BERNARDON, D. P., PFISHER, L.L., PORTO, D. **Otimização da Operação de Redes de Distribuição para a Redução de Perdas de Energia no ambiente Smart Grid**, Simpósio Brasileiro de sistemas elétricos, Natal Rio Grande do Norte, 2016.

MENDOZA, J., LÓPEZ, R., MORALES, D., & LÓPEZ, E. **Minimal Loss Reconfiguration Using Genetic Algorithms With Restricted Population and Addressed Operators: Real Application**. IEEE Transactions on Power Systems, VOL. 21(NO. 2), pp. 948 - 954, 2006.

MERLIN, A., & BACK, H. **Search for a Minimal-Loss Operation Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System**. 5th Power Syst. Conf., (pp. 1-18). Cambridge, U.K., 1975.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO **Redes Elétricas Inteligentes -**

Diálogo Setorial Brasil-União Europeia, Relatório técnico, Brasília, 2014.

MODBUS ORGANIZATION. **Modbus Application Protocol Specification V1.1b3 (2012)**. Disponível em: www.modbus.org. Acesso em: 20/02/2017.

MORAES C. C., CASTRUCCI P. de L. Engenharia de Automação Industrial. 2ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

PEPONIS G.J, PAPADOPOULOS M. P. **New Dynamic, branch Exchange method for optimal distribution system planning**. IEEE Proc. Cener. Transm. Distrib., Vol 144, No 3, 1997

PEREIRA, P. R. **Controle hierárquico e adaptativo para aumento do desempenho operacional de reguladores de tensão em redes elétricas inteligentes**. Tese de doutorado em engenharia elétrica, 2014.

PEREIRA, P. R., CANHA, L. N., ABAIDE, A. R., EMMEL, J. R. R. **Aplicação do Potencial das Redes Inteligentes (Smart Grid) no Aumento da Eficiência Operacional de Reguladores de Tensão e Zonas de TAP em Sistemas de Distribuição**. XIX SENDI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Rio de Janeiro, 2010.

PFITSCHER, L., **Reconfiguração automática das redes de energia elétrica com monitoramento em tempo real**. Tese (Doutorado em engenharia elétrica) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

PIPATTANASOMPORN, M., FEROZE, H., & RAHMAN, S. **Multi-Agent Systems in a Distributed Smart Grid: Design and Implementation**. Proc. IEEE PES 2009 Power Systems Conference and Exposition (PSCE'09). Seattle, Washington, USA, 2009.

PUBLIC UTILITY COMMISSION OF TEXAS. **Distributed Generation Interconnection Manual**. [S.l.]: [s.n.], 2001.

RAMASWAMY P.C., DECONINCK G., **Smart Grid Reconfiguration Using Simple Genetic Algorithm and NSGA-II**. 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, 2012.

REIS, B. F., SALGADO, G. C., LEITE, M. A., BARBOSA, C. H., PEREIRA, E. C., & VASCONCELOS, J. A. **Representação Eficiente de Soluções Para o Problema de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Primária**. Congresso Brasileiro de Automática. Campina Grande/PB, 2012.

SACHDEVA P., KATCHII S. **A Review Paper on Raspberry Pi**. International Journal of Current Engineering and Technology. Vol. 4. No6, 2014.

SHIRMOHAMMADI, D., HONG, H. W. **Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, 1989.

SPATTI D. N. **Automatização de processos de detecção de faltas em linhas de distribuição utilizando sistemas especialistas híbridos.** Tese de doutorado em Engenharia Elétrica, 2011.

STRAUSS, C. **Practical Electrical Network Automation and Communication Systems.** Newnes. Australia, 2003.

SWARNKAR, A., GUPTA, N., & NIAZI, K. **A novel codification for meta-heuristic techniques used in distribution network.** Electric Power Systems Research 81, pp. 1619–1626, 2011.

TOSHIBA. **Controle para Regulador de Tensão Monofásico TB-R1000.** Manual de Instruções, 2011.

TURITSYN, K., ŠULC, P., BACKHAUS, S., CHERTKOV, M. **Options for control of reactive power by distributed photovoltaic generators,** Proc. IEEE, vol. 99, no. 6, pp. 1063–1073, 2011.

VIEIRA, J. G., GRANATO, S., **Medição inteligente e a Smart Grid.** Smartgrid news, 2011. Disponível em: <<http://smartgridnews.com.br/conheca-com-exclusividade-o-primeiro-trabalho-sobre-smart-grid-desenvolvido-por-pesquisadores-brasileiros/>>. Acesso em: 06 de jun. 2017.

VIRGÍLIO, K. E. P. **Alternativas Para a Geração De Energia com Geração Distribuída E Pequenas Centrais Hidrelétricas,** Tese de conclusão de curso: 2012.

WARNEY A. S. **Utilização de Recursos de Compensação Reativa de Indústrias no Controle de Tensão de Sistemas Elétricos.** Tese de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

ZHU, J. Z. **Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm.** Electric Power Systems Research 62, pp. 37–42, 2002.