PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CONTROLE FUZZY VOLT/VAR EM

Sistemas de Distribuição

LEONARDO ELIZEIRE BREMERMANN

ORIENTADOR – PROF. DR. FLÁVIO ANTONIO BECON LEMOS

PORTO ALEGRE, MARÇO DE 2008.

LEONARDO ELIZEIRE BREMERMANN

CONTROLE FUZZY VOLT/VAR EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Orientador: Professor Dr. Flávio Antonio Becon Lemos

PORTO ALEGRE, MARÇO DE 2008.

Dedicatória

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que se esforçam para aprimorar o aprendizado, desenvolver novas técnicas e tecnologias que melhorem a qualidade de vida das pessoas, àqueles que se preocupam com o próximo.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me proteger durante todo este período, aos amigos e namorada Alessandra que compreenderam certas ausências, ao meu orientador professor Flávio A. Becon Lemos que além de orientar, também foi um dos responsáveis pela oportunidade que tive de terminar este trabalho junto ao Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto – INESC-Porto, em Portugal. Também agradeço ao professor Vladimiro Miranda, diretor do INESC-Porto, que me recebeu e também foi responsável pela minha ida. Agradeço ao apoio que tive dos meus irmãos Luis e Liana, meu pai Enrique e principalmente da minha mãe, Déa, que não mediu esforços para que eu pudesse concluir mais esta fase. Agradeço as empresas Rio Grande Energia – RGE e Centrais Elétricas de Santa Catarina – CELESC pelo apoio financeiro. Agradeço a todos que de certa forma me influenciaram na conclusão desta dissertação.

Resumo

Esta dissertação apresenta uma metodologia de controle de tensão e potência reativa de sistemas de distribuição baseada em um controle centralizado, composto por uma cascata de controladores fuzzy do tipo Mamdani. Este tipo de controle é filosoficamente separado em duas funções: o controle de tensão e o controle de reativos. Entretanto, para que haja eficácia do controle sobre a rede, de forma segura e econômica, é necessária uma coordenação dos dispositivos de controle de tensão e das fontes de reativos presentes na rede, a qual costuma ser referenciada como controle volt/var. A metodologia desenvolvida executa a coordenação dos dispositivos de controle de tensão e fontes de reativos de redes de distribuição de média tensão, que inclui os transformadores com mudança de tap sob carga - LTC, banco de capacitores localizados nas subestações e ao longo dos alimentadores e reguladores de tensão dos alimentadores. Isto é efetuado utilizando-se um conceito de faixa de regulação, onde é estabelecida uma banda morta de nível de tensão para que haja atuação dos controles, os quais são selecionados através da utilização de efetividades dos equipamentos de controle em relação à tensão nos nós da rede. São explorados os efeitos do modelo de carga sob o controle e o impacto de fechamento de malhas como opção de operação em redes de média tensão. São apresentados, ainda, os resultados e análises das simulações de dois sistemas de distribuição que demonstram a eficácia da proposta apresentada.

Abstract

This dissertation presents a methodology to deal with voltage and reactive power control in distribution systems based in a centralized control, which is represented for a cascading of Mamdani fuzzy controllers. This type of control used to be separated in two functions: voltage control and reactive control. However, in order to have efficiency of control on network, in a safe and economic way, it is need a coordination of control devices and reactive sources connected in the network, which is called volt/VAR Control. The methodology developed executes a coordination of devices of voltage control and reactive sources of medium voltage distribution networks, represented by under load tap changing, capacitor banks connected in substations and along of feeders and feeder voltage regulators. This is realized using the concept of dead band regulation, where is defined a voltage dead band where no control action is required, and devices for use are selected using a sensitivity relation between control devices and voltage in all network nodes. The effects of load models on voltage control and the impact of ring operation in medium voltage network are explored. The results and simulation analysis of two distribution system are presented, demonstrating the efficiency of the proposed approach.

Sumário

1.	Intro	dução	12 -			
	1.1.	Revisão Bibliográfica	14 -			
	1.2.	Objetivos	20 -			
1.3.		Contribuições da Dissertação				
	1.4.	Estrutura da Dissertação	21 -			
2.	Cont	role de Tensão em Sistemas de Distribuição	22 -			
	2.1.	Operação de Sistemas de Distribuição	22 -			
	2.1.1	. Automação da Distribuição	23 -			
	2.1.2	2. Estados de Operação	25 -			
	2.2.	Hierarquia de Controle	28 -			
	2.3.	Dispositivos Utilizados para Controle de Tensão/ Potência Reativa	31 -			
	2.3.1	. Transformadores com Mudança de Tap sob Carga	31 -			
	2.3.2	2. Banco de Capacitores	32 -			
	2.3.3	Reguladores de Tensão	32 -			
	2.3.4	. Gerador	36 -			
	2.4.	O Controle volt/var	37 -			
3.	Lógi	ca Fuzzy	39 -			
	3.1.	Conceito	39 -			
	3.2.	Conjuntos Fuzzy	41 -			
	3.3.	Universo de discurso	43 -			
	3.4.	Subconjuntos Fuzzy	43 -			
	3.5.	Operações de Conjuntos	44 -			
	3.6.	Números Fuzzy	45 -			
	3.7.	Funções de pertinência	47 -			
	3.8.	Intersecção de conjuntos Fuzzy	48 -			
	3.9.	União de conjuntos Fuzzy	49 -			
	3.10.	Operadores de intersecção Fuzzy	49 -			
	3.11.	Operadores de união Fuzzy	50 -			
	3.12.	Projeto de um sistema fuzzy	51 -			
	3.13.	Fuzzyficação	52 -			

	3.	14.	D	esfuzzyficação	53 -	
	3.	15.	R	egras Fuzzy	54 -	
	3.	16.	C	ontroladores Fuzzy	55 -	
4		Met	odolo	gia proposta	57 -	
	4.	1.	Mat	iz Efetividade	60 -	
	4.2	2.	Con		62 -	
	4.	3.	Açã	o de controle	67 -	
	4.4	4.	Flux	o de potência	68 -	
		4.4.1	۱.	Modelos dos equipamentos do sistema de distribuição	71 -	
		Trechos o		e Alimentadores	71 -	
		Transformadores com relação 1:a				
Capacito			acitor	es Shunt	72 -	
Cargas					73 -	
		Regulador de tensão				
		Reg	ulado	r do tipo LDC (Line Drop Compensator)	75 -	
		Gera	ação I		75 -	
5		Sim	ulação	e Análise	77 -	
	5.	1.	Aná	lise do método para um sistema radial	79 -	
	5.2	2.	Case	o com sistema em anel	83 -	
	5.3	3.	Siste	- ma Roçado, alimentador 06	86 -	
		5.3.1	1.	Simulação do alimentador RCO-06 sem GD	88 -	
		5.3.2	2.	Simulação do alimentador RCO-06 com inclusão da GD	91 -	
		5.3.3	3.	Efeito do modelo de carga no sistema RCO-06	93 -	
	5.4	4.	GD	como equipamento de controle	96 -	
6		Con	clusõ	es	98 -	
	6.	1.	Trat	alhos futuros 1	102 -	
7		Refe	erênci	as Bibliográficas 1	103 -	

Lista de Figuras

FIGURA 2-1 – ESTADOS DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO [MONTICELLI, 1983]	25 -
FIGURA 2-2 – HIERARQUIA TÍPICA DE CONTROLE DE UMA EMPRESA [GREEN E WILSON, 2007]	29 -
FIGURA 2-3 - DIAGRAMA FASORIAL COMO EFEITO SOBRE A TENSÃO SEM (A) E COM (B) A INSERÇÃ	O DO
BANCO DE CAPACITORES	32 -
FIGURA 2-4 - ESQUEMÁTICO DO AJUSTE DE TAP NO COMUTADOR TIPO REATÂNCIA COM CHAVE	
REVERSORA E ENROLAMETO EQUALIZADOR [HARLOW, 2004].	33 -
FIGURA 2-5 - REGULAÇÃO DE TENSÃO TIPO A [HARLOW, 2004]	34 -
FIGURA 2-6 - REGULAÇÃO DE TENSÃO TIPO B [HARLOW, 2004]	34 -
FIGURA 2-7 – REGULADOR DE TENSÃO LDC [HARLOW, 2004]	35 -
FIGURA 2-8 – EFEITO DOS DISPOSITIVOS DE CONTROLE SOBRE O PERFIL DE TENSÃO	38 -
FIGURA 3-1. DIFERENÇA ENTRE PRECISÃO E SIGNIFICADO [FUZZY LOGIC TOOLBOX, 1995]	- 40 -
FIGURA 3-2. CONJUNTO CLÁSSICO	41 -
FIGURA 3-3. CONJUNTO FUZZY.	42 -
FIGURA 3-4. OPERAÇÕES BÁSICAS DE CONJUNTOS UTILIZANDO DIAGRAMA DE VENN	44 -
FIGURA 3-5. NÚMERO REAL, CONJUNTO ZERO	45 -
FIGURA 3-6. NÚMERO FUZZY, CONJUNTO QUASE ZERO	45 -
FIGURA 3-7 - NÚMERO FUZZY, CONJUNTO PRÓXIMO DE ZERO	46 -
FIGURA 3-8 - EXEMPLO DE FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	47 -
FIGURA 3-9 - FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA NÃO SIMÉTRICAS	48 -
FIGURA 3-10. DIAGRAMA DO PROCESSO DE UM SISTEMA FUZZY	52 -
FIGURA 3-11 – CONJUNTOS FUZZY PARA O ESPAÇO DE ENTRADA, <i>VIOLAÇÃO DE TENSÃO</i>	53 -
FIGURA 3-12 – MÉTODO CENTRO-DA-ÁREA [SHAW E SIMÕES, 1999]	54 -
FIGURA 4-1 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE <i>CONTROLE VOLT/VAR</i>	59 -
FIGURA 4-2 - FLUXOGRAMA PARA A CONSTRUÇÃO DA MATRIZ EFETIVIDADE	62 -
FIGURA 4-3 - CONJUNTO DE CONTROLADORES DE TENSÃO	63 -
FIGURA 4-4 - FLUXOGRAMA DA ETAPA 2, EXECUÇÃO DA CASCATA DE CONTROLADORES DE	
Mamdani	65 -
FIGURA 4-5 – MAPA DE REGRAS DO CONTROLADOR C1 [MIRANDA ET. ALLI, 2007]	65 -
FIGURA 4-6 – MAPA DE REGRAS DO CONTROLADOR C2 [MIRANDA ET. ALLI, 2007]	65 -
FIGURA 4-7 – MAPA DE REGRAS GERADO PELO FUZZY LOGIC TOOLBOX DO MATLAB	66 -

FIGURA 4-8 - FLUXOGRAMA DA ETAPA DE AÇÃO DE CONTROLE	67 -
FIGURA 4-9 – MODELO PARA EXPLANAÇÃO DOS CÁLCULOS DAS TENSÕES NODAIS	70 -
FIGURA 4-10 – MODELO π de um trecho de alimentador	71 -
FIGURA 4-11 – MODELO π do transformador com relação <i>1:a</i>	72 -
FIGURA 4-12 – MODELO DO CAPACITOR.	73 -
FIGURA 4-13 – MODELO DA GD	76 -
FIGURA 5-1 – CURVA DE CARGA NA SUBESTAÇÃO	77 -
FIGURA 5-2 - SISTEMA EXEMPLO DE 32 NÓS	78 -
Figura 5-3 – Tensões dos nós, às 06h	79 -
FIGURA 5-4 – PERFIL DE TENSÃO DOS NÓS 25 A 32, ÀS 18H	81 -
FIGURA 5-5 – SISTEMA SEM MARGEM DE CONTROLE, ÀS 19H	81 -
Figura 5-6 – Tensões dos nós, às 22h	82 -
FIGURA 5-7 – FLUXO DE POTÊNCIA REATIVA, ÀS 11H	82 -
FIGURA 5-8 – PERFIL DE TENSÃO, ÀS 11H	83 -
FIGURA 5-9 – SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM ANEL	84 -
Figura 5-10 – Sistema em anel, tensões dos nós às 06h	85 -
Figura 5-11 – Tensões dos nós, às 23h	86 -
FIGURA 5-12 – SISTEMA ROÇADO 06	87 -
FIGURA 5-13 – CURVA DE CARGA SISTEMA RCO-06.	88 -
FIGURA 5-14 – TENSÕES DO SISTEMA RCO-06, ÀS 06H	88 -
Figura 5-15 – Tensões do sistema RCO-06, às 18h	90 -
Figura 5-16 – Tensões do sistema RCO-06, às 23h	90 -
FIGURA 5-17 – PERFIL DE TENSÃO COM E SEM GD	91 -
Figura 5-18 – Tensões do sistema RCO-06, às 10h	92 -
FIGURA 5-19 – EFEITO DO MODELO DE CARGA NO ALIMENTADOR RCO-06 ÀS 06H	93 -
FIGURA 5-20 – PERFIS DE TENSÃO COM DIFERENTES MODELOS DE CARGA	94 -
FIGURA 5-21 – PERFIL DE TENSÃO COM DIFERENTES MODELOS DE CARGA ÀS 18H	95 -
Figura 5-22 – Tensões em função do modelo da GD e tensão sem GD no sistema	97 -

Lista de Tabelas

TABELA 5-1 - CARACTERÍSTICAS DOS DISPOSITIVOS DE CONTROLE DO SISTEMA EXEMPLO	- 78 -
TABELA 5-2 – TABELA DO COMPORTAMENTO DOS DISPOSITIVOS, UNIDADES EM PU	- 80 -
TABELA 5-3 – TABELA DO COMPORTAMENTO DOS DISPOSITVOS, UNIDADES EM PU	- 85 -
TABELA 5-4 – Alocação dos equipamentos de controle	- 87 -
TABELA 5-5 – AÇÕES DE CONTROLE EFETUADAS PARA O SISTEMA RCO-06	- 89 -
TABELA 5-6 – COMPORTAMENTO DOS DISPOSITIVOS DO SISTEMA RCO-06	- 92 -
TABELA 5-7 – COMPORTAMENTO DOS DISPOSITIVOS PARA A SIMULAÇÃO DE MODELO DE CARGA	- 94 -

1. Introdução

Como um produto, que deve ser fornecido a seus consumidores, a energia elétrica necessita manter padrões de qualidade e confiabilidade de fornecimento que são regulados por normas e fiscalizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Um dos aspectos fundamentais do serviço de entrega do produto energia elétrica é a manutenção do nível de tensão de fornecimento dentro dos limites de 0,95 e 1,05 pu, os quais devem ser obedecidos em todos os níveis de tensão do sistema de distribuição (SD). Desta forma, torna-se fundamental dispor de sistemas que possibilitem simular e analisar ações de controle, as quais sejam efetivas para manter as tensões nos alimentadores dentro de uma faixa pré-determinada, pela Resolução ANEEL 505/2001, em condições normais de operação para a curva de carga diária, bem como apresentar as melhores soluções factíveis de operação para condições de emergência.

O atual nível de automação dos sistemas de distribuição, que permite aumentar o número de pontos monitorados e controlados, está impulsionando o desenvolvimento e a utilização de controle centralizado de tensão e potência reativa, o chamado *controle volt/var*. De acordo com a referência [Roytelman *et. Alli*, 1995] o *controle volt/var* é uma das funções mais importantes e vitais de um moderno DMS (Distribution Management System) [Green e Wilson, 2007].

Os seguintes requisitos são esperados de um sistema volt/var [Roytelman et. Alli, 1995]:

- proporcionar ações coordenadas dos equipamentos;
- possibilidade de implementar diferentes funções objetivos, levando em conta o tipo de operação desejada;
- remover violações de tensão do sistema;
- diminuir o fluxo de reativos;
- manter os níveis de potência reativa e perfil de tensão do sistema para uma operação econômica.

Para viabilizar uma estratégia de controle centralizado de tensão deve-se levar em conta:

- controladores locais devem ter a capacidade de responder a pequenas perturbações na sua área de atuação, sem interferência do controlador central e nos demais controladores;
- o controlador central deve ter a capacidade de mudar a estratégia de controle dos controladores locais, ou sua referência, via envio de sinal pelo sistema SCADA, coordenando-os para atingir um objetivo e garantir a segurança de tensão global do sistema;
- diferentes estratégias de controle, ou funções objetivos, devem ser possíveis de serem ativadas no controlador central, tanto para condições normais quanto para condições de emergência.

Nos últimos anos começou a ser explorada a utilização de sistemas baseados em *lógica fuzzy* para abordar problemas de diversas áreas em sistemas de energia [El-Hawary, 1998]. O problema de *controle volt/var* utilizando *lógica fuzzy* permite construir sistemas que incorporam problemas típicos de sistemas de distribuição como, por exemplo, o baixo número de pontos de monitoração e a incerteza nos valores das demandas.

Nesta dissertação é desenvolvida uma metodologia de *controle volt/var* de sistemas de distribuição baseada em um controle centralizado. Este é representado por uma cascata de controladores *fuzzy* do tipo Mamdani. Esta metodologia é um aprofundamento e melhoria das técnicas desenvolvidas nas referências [Miranda *et. Alli*, 2007; Miranda e Calisto, 2002]. Este tipo de controle é filosoficamente separado em duas funções: o controle de tensão e o controle de reativos [Green e Wilson, 2007], e costuma ser referenciado como *controle volt/var*. Entretanto, para que haja eficácia do controle sobre a rede, de forma segura e econômica, é necessário uma coordenação conjunta dos dispositivos de controle de tensão e das fontes de reativos presentes na rede. Desta forma, o foco da dissertação é a coordenação dos dispositivos de controle de tensão e fontes de reativos de redes de distribuição de média tensão, que inclui os transformadores com mudança de tap sob carga – LTC, banco de capacitores localizados nas subestações e ao longo dos alimentadores e reguladores de tensão dos alimentadores. Isto é efetuado utilizando um conceito de faixa de regulação, onde é estabelecida uma banda morta de nível de tensão para que haja atuação dos controles, os quais são selecionados através da utilização de uma matriz

efetividade que determina qual equipamento de controle tem maior ação de controle sobre determinado nó da rede. São explorados o efeito do modelo de carga sob o controle, o impacto de fechamento de malhas como opção de operação e a inclusão de geração distribuída no sistema. Resultados de exemplos com diferentes topologias são apresentados e comentados, demonstrando a eficácia da proposta apresentada.

A próxima seção apresenta uma revisão bibliográfica do tema controle de tensão/potência reativa em sistemas de distribuição, utilizada como embasamento teórico desta dissertação.

1.1. Revisão Bibliográfica

Muitos dos atuais sistemas de distribuição ainda exibem vulnerabilidades em relação ao suporte de reativos e controle de tensão, seja por falta de investimentos e/ou por falta de políticas consistentes de automação e utilização de técnicas de controle coordenado de tensão em tempo de operação. Esta situação, em combinação com aspectos regulatórios e econômicos relacionados aos serviços de fornecimento de energia, tem renovado esforços de pesquisadores no sentido de estudar novas técnicas de controle coordenado de tensão que sejam economicamente viáveis e eficientemente seguras. A referência [Thatte e Ilic, 2006] apresenta uma avaliação do emprego de vários dispositivos de controle de tensão/potência reativa em sistemas de distribuição. Tendências como Recursos de Energia Distribuída – DER, em especial a utilização de Geração Distribuída - GD, são avaliados, principalmente pela potencialidade de fornecer energia próximo às cargas. Este novo cenário necessita de pesquisas no sentido de adaptar antigas técnicas de controle, propondo melhorias, e novas técnicas que levem em conta estas tendências. São apresentadas avaliações considerando LTC, GD, DER, banco de capacitores, compensadores estáticos de reativos e Super Var Controllers. Comentários e análises dinâmicas sobre o desempenho e necessidade de coordenação entre os diversos equipamentos também são apresentados. Não foi aborada, nesta referência, a coordenação dos dispositivos de controle, apenas a avaliação dos seus efeitos sobre a rede. A referência [Ilic e Lim, 1991] mostra aspectos teóricos e práticos sobre coordenação de controle em sistemas de distribuição, porém trata apenas do dispositivo de controle LTC.

Um relatório apresentado por Evans [Evans, 2005] demonstra que a utilização de DER e GD, através de uma correta localização e técnicas de coordenação, pode melhorar a operação da

rede de distribuição e refletir na segurança do sistema de distribuição, uma vez que melhora de forma indireta a margem de segurança de tensão dos nós de interligação.

Existem poucos trabalhos na literatura que apresentam o problema de coordenação de tensão de forma global e em tempo de operação. A maior parte dos trabalhos enfoca o problema de forma isolada (coordenação de reguladores de tensão, coordenação de banco de capacitores) ou de blocos de dispositivos (regulador - banco de capacitores, ou LTC – regulador, ou LTC – banco de capacitores). Alguns poucos trabalhos fazem análise incluindo os dispositivos de *controle volt/var* integrados, e mesmo assim apresentam o problema de forma desacoplada.

As principais referências em relação ao *controle volt/var* de forma mais abrangente, bem como relatos de aplicações práticas são os trabalhos desenvolvidos por Roytelman [Roytelman *et. Alli*, 1995; Roytelman *et. Alli*, 1998; Roytelman e Ganesan, 1999; Roytelman e Ganesan, 2000].

No artigo [Roytelman et. Alli, 1998] é descrito um projeto de controle volt/var de um modelo centralizado de controle de um sistema de distribuição de 13.8 kV. O objetivo do projeto é estimar a efetividade do esquema de *controle volt/var* baseado em diferentes funções objetivo, incluindo uma função objetivo baseada em investimentos e mercado (revenue maximization). Uma discussão sobre aspectos técnicos e uma avaliação de pontos críticos de implementação deste tipo de controle é apresentada. A efetividade dos esquemas de controle volt/var para conservação de energia e maximização de investimentos é calculada como um efeito devido à mudança imediata do padrão da demanda (dentro de um espaço de minutos) determinado pela relação da carga com a tensão. Este efeito é comparado com condições atuais de operação e seu ganho determinado. A referência [Roytelman et. Alli, 1995] apresenta um algoritmo de controle volt/var (VVC) para implantação em sistemas de DMS. O algoritmo é baseado no método descendente de coordenação discreta orientada e leva em consideração a maioria das funções objetivos de sistemas de distribuição: minimização de perdas, demanda de potência ou número de passos de controle para manter as variáveis do sistema dentro da faixa de controle. Embora o método de otimização usado pertença a uma classe tradicional de métodos de programação inteira combinatorial, o algoritmo apresenta boa velocidade para aplicações de tempo real. São apresentados exemplos numéricos para ilustrar o comportamento dos algoritmos para diferentes funções objetivos e sua vantagem em comparação com outras estratégias de otimização. O artigo trata o limite de tensão como restrição de operação e não como objetivo do controle volt/var, logo não assegura que a solução seja boa para o controle de tensão, mas assegura que as tensões

do sistema estarão dentro de um limite definido para determinada função objetivo. Em [Roytelman e Ganesan, 1999] são explorados aspectos de controle locais automáticos e reconfiguração do sistema, são ferramentas indispensáveis na operação de modernos sistemas elétricos. Este tipo de funcionalidade agregada aos atuais DMS traz duas novas funções de tempo real: controle volt/var e reconfiguração ótima de alimentadores. Estas funcionalidades têm sido tradicionalmente utilizadas como ferramentas de planejamento, desacopladas da operação. Neste artigo são discutidas as utilizações de aplicações de reconfiguração em controle volt/var em tempo real, as quais criam novas oportunidades de controle para tornar mais efetiva e econômica a operação de sistemas de distribuição. Sugestões de como estas funções podem ser coordenadas com controladores locais são discutidas e ilustradas como exemplo. O artigo não trata do regulador de tensão, presente nos sistemas de distribuição, como dispositivo de controle. Em [Roytelman e Ganesan, 2000] os autores ainda descrevem como o LTC e os controladores locais de banco de capacitores são modelados nos algoritmos de fluxo de potência e como eles interagem e afetam funções relacionadas no DMS. O impacto desta modelagem no fluxo de potência, na função volt/var e na reconfiguração ótima dos alimentadores são ilustradas por exemplos numéricos.

A referência [Hsu e Kuo, 1993] apresenta uma metodologia para despacho ótimo de banco de capacitores, baseado na previsão de demanda horária do próximo dia, utilizando programação dinâmica. O objetivo é a minimização das perdas, levando em conta restrições de número máximo de chaveamentos dos bancos de capacitores e limites de tensão no alimentador.

Em [Lu e Hsu, 1995] o problema de controle de tensão/potência reativa é investigado. Uma abordagem baseada em programação dinâmica é apresentada para realizar o despacho dos bancos e capacitores e ajustar o tap do LTC da subestação de distribuição, utilizando a previsão horária da carga do transformador e a sua tensão primária, tal que o fluxo de potência reativa através do transformador, e os desvios da tensão secundária possam ser minimizados. Restrições em relação aos limites das tensões de operação, primária e secundária, e limites máximos de chaveamento são considerados para o LTC. Este artigo não utiliza os reguladores de tensão como dispositivo de controle e também não trata da coordenação entre os equipamentos de controle apresentados.

A possibilidade de controle da demanda através de esquemas de controle de tensão/potência reativa é descrito na referência [Nielsen e Markushevich, 1998]. Um projeto piloto de automação da distribuição é apresentado, o qual utiliza dados de tempo real coletados

de múltiplos pontos do sistema de 138 kV e do sistema de 25 kV, utilizando PLC (*Programmable Logic Controller*) e comunicação com relés digitais e dispositivos de automação de rede. Os sinais depois de processados são enviados para ajustar as referências dos LTC e mudar o status dos capacitores localizados nos alimentadores, fechando um laço de controle. Resultados obtidos em 1997/98 são apresentados. Mais uma vez os reguladores de tensão não são utilizados como dispositivos de controle. A referência [O'Gorman e Redfern, 2004] discute o controle de tensão em redes de distribuição chamadas de redes ativas. Fatores como o incremento do carregamento e a presença e aumento de geradores distribuídos contribuem para ampliar os problemas de controle de tensão em regime permanente.

Alguns autores [Salama e Chikhani, 1992; Laframboise *et. Alli*, 1995; Loc-Le e Negnevitsky, 1997] propõem a utilização de sistemas especialistas ou sistemas baseados em conhecimento, para abordar o problema do controle de tensão em sistemas de distribuição.

As referências [Salama e Chikhani, 1992; Laframboise *et. Alli*, 1995] apresentam uma proposta de um sistema especialista para ser utilizado para planejamento e operação de sistemas de distribuição. Em [Salama e Chikhani, 1992] é proposto um sistema especialista para compensação ótima de potência reativa que utiliza regras heurísticas e expertise técnica. Os dispositivos envolvidos para o controle e despacho de reativos são bancos de capacitores e reguladores de tensão. Na referência [Laframboise *et. Alli*, 1995] o sistema proposto em [Salama e Chikhani, 1992] é descrito em termos de aplicação e desenvolvimento, focando nos estágios de curto e longo prazo de controle de tensão e redução de perdas usando banco de capacitores e reguladores de tensão. É feito, ainda, um comentário que do ponto de vista ideal o sistema deveria estar integrado a um sistema SCADA, para ser efetivo no controle da tensão em nível de operação. Na referência [Loc-Le e Negnevitsky, 1997] é apresentado um sistema especialista para tratar o problema de controle de tensão e potência reativa em um sistema de grande porte considerando uma rede equivalentada em um modelo de regime permanente. É utilizado o método da árvore de sensibilidade para selecionar o conjunto de ações ótimas para resolver os problemas e violação de tensão.

A utilização de redes neurais tem sido explorada na literatura como uma ferramenta com potencialidades para suportar o problema do controle de tensão em nível de operação on-line.

Na referência [Hsu e Lu, 1998] é apresentado um método para determinar o status dos bancos de capacitores e a posição dos LTC para as 24 horas do próximo dia. Para atingir este objetivo é implementada uma rede neural para fazer o despacho dos capacitores e seleção do tap

dos LTC. As entradas da rede são a potência ativa e reativa e as tensões primárias e secundárias, ambas do transformador da subestação, e as saídas são o status dos bancos de capacitores e posição dos taps dos LTCs. O despacho preliminar é então refinado utilizando programação dinâmica *fuzzy*.

Em [Gu e Rizy, 1996] é apresentada uma rede neural para controlar banco de capacitores e reguladores de tensão em redes de distribuição. O objetivo do controlador neural é minimizar as perdas ôhmicas e manter as tensões dentro dos limites de operação. A avaliação do desempenho do controle é realizada para diferentes seleções de entradas e conjuntos de treinamentos, sendo os resultados de desempenho discutidos e comparados.

Um método baseado em uma rede neural artificial em conjunto com programação dinâmica para despacho de bancos de capacitores é apresentado na referência [Hsu e Yang, 1994]. Também é proposta uma estratégia de programação dinâmica assistida por uma rede neural para contornar o problema do alto tempo computacional de métodos de programação dinâmica. Neste método, os procedimentos de programação dinâmica são executados utilizando dados históricos. Os resultados são então manipulados e o conhecimento é extraído através da técnica de algoritmos de clusters, obtendo-se uma base de dados reduzida e pode-se aplicar novamente uma programação dinâmica para prever o despacho ótimo dos bancos de capacitores. São utilizados dois tipos de algoritmos de cluster, o hard clustering Euclidiano e o soft clustering para um aprendizado não supervisionado de uma rede neural. Ambos são comparados e analisados.

Outra classe de algoritmos de otimização de ações de controle é baseada em computação evolucionária, onde entre os mais representativos estão incluídos os que utilizam *lógica fuzzy* (Fuzzy Logic) descritos nas referências [Liang e Wang, 2003; Ramakrishna e Rao, 1999; Ramakrishna e Rao, 1998; Miranda *et. Alli* 2007; Miranda e Calisto 2002; Ekel *et. Alli* 1998; Rahideh e Shaheed, 2006; Yokoyama *et. Alli*, 1993; Su *et. Alli*, 1996], enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization –* PSO) [Yoshida *et. Alli*, 2000; Fukuyama e Yoshida, 2001] e EPSO (*Evolucionary Particle Swarm Optimization*) [Miranda e Fonseca, 2002a; Miranda e Fonseca, 2002b; Miranda e Fonseca, 2002c].

Em [Liang e Wang, 2003] um esquema de controle de tensão e potência reativa baseado em regras *fuzzy* é apresentado. O objetivo principal é achar a melhor combinação entre a posição do tap dos LTCs e o status dos bancos de capacitores durante a operação diária, tal que o desvio da tensão na nó secundária do transformador seja o menor possível, bem como o fluxo de reativos através do transformador e as perdas ativas no alimentador sejam minimizadas. É utilizado como restrição o máximo número de chaveamentos dos bancos de capacitores e mudança de tap dos LTCs. Nesse artigo o problema de controle de tensão e potência reativa é primeiro formulado com a abordagem *fuzzy* e então uma técnica de *simulated anneling* é usada para encontrar a melhor combinação entre a posição dos tap e o status dos bancos de capacitores.

A referência [Ramakrishna e Rao, 1999] descreve uma abordagem *fuzzy* para o problema volt/var em sistemas de distribuição. Perda de potência e sensibilidade de tensão, obtidas de um caso base de fluxo de potência, são utilizadas como entradas de um sistema fuzzy, o qual provê regras para dois problemas desacoplados. As regras são adaptadas usando uma rede neural, e contribuem para uma compreensão qualitativa do processo de inferência do operador. O esquema proposto foi implementado usando C e o toolbox de *fuzzy* do Matlab. O artigo [Ramakrishna e Rao, 1998] propõe um sistema baseado em inferência *fuzzy* para auxiliar o operador no controle de tensão e minimização das perdas, considerando que o problema de controle e regulação de tensão é desacoplado do problema de minimização das perdas [fuzzy inference system]. As referências [Yoshida et. Alli, 2000; Fukuyama e Yoshida, 2001] apresentam a utilização de PSO (Particle Swarm Optimization) em problemas de controle de tensão. As referências [Miranda e Fonseca, 2005; Miranda e Fonseca, 2002a; Miranda e Fonseca, 2002b] apresentam uma metaheurística construída a partir da união das características de estratégias evolucionárias (evolution strategies - ES) e otimização usando enxame de partículas (particle swarm optimization - PSO). Esta aproximação híbrida tem se mostrado, em muitos casos, mais precisa e robusta que os métodos clássicos de PSO. São apresentados exemplos de aplicação na minimização de perdas e controle de tensão, utilizando redes exemplos.

Nenhuma das referências aqui relacionadas tratou do *controle volt/var* coordenado em sistemas de distribuição de média tensão, utilizando de forma acoplada os equipamentos mais comumente encontrados na rede, como o LTC, o regulador de tensão e os bancos de capacitores. Muitos trataram o problema com um ou dois destes equipamentos e mesmo assim alguns utilizaram a tensão/potência reativa como restrições operativas ou trataram os equipamentos de forma desacoplada, não sendo a coordenação dos mesmos parte do problema.

1.2. Objetivos

Os principais objetivos desta dissertação podem ser sintetizados em:

- estudar o problema de controle hierárquico de tensão em sistemas de distribuição;
- realizar uma revisão bibliográfica sobre o problema de controle de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica;
- avaliar as abordagens existentes sobre controle de tensão e potência reativa, suas vantagens e limitações.

A partir destes três tópicos podemos entender melhor o problema de controle *volt/var* em sistemas de distribuição e como tratá-lo em tempo de operação.

1.3. Contribuições da Dissertação

As principais contribuições desta dissertação são:

- desenvolver um estudo sobre coordenação de tensão em redes de média tensão utilizando os equipamentos tradicionais de controle de tensão/potência reativa, representado pelos transformadores com mudança de tap sob carga – LTC, banco de capacitores localizados nas subestações e ao longo dos alimentadores e reguladores de tensão dos alimentadores;
- aprofundar os estudos sobre a utilização de *lógica fuzzy* para construir uma metodologia de controle de tensão centralizado e coordenado;
- incluir e avaliar os efeitos de geração distribuída sobre o problema de *controle* volt/var em redes de média tensão;

- utilizar os equipamentos de *controle volt/var*, tais como o LTC, banco de capacitores e regulador de tensão de forma coordenada e acoplada, para solucionar o problema de controle de tensão/potência reativa;
- avaliar o efeito de diferentes modelos de carga no comportamento do método proposto;
- analisar o comportamento do método proposto para operação do sistema em malhas.

Para ilustrar as abordagens desenvolvidas nesta dissertação são realizadas simulações em um sistema exemplo e um sistema real. Os resultados obtidos são discutidos e analisados.

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em seis Capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a introdução sobre o assunto seguida da revisão bibliográfica.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão sobre controle de tensão em sistemas de distribuição, passando, em seguida, pela hierarquia do controle de tensão. Logo após, no Capítulo 3, são comentados os principais tópicos sobre *Lógica Fuzzy*, com o objetivo de mostrar o quanto este método é próprio para o problema de controle de tensão e potência reativa em sistemas de distribuição.

No Capítulo 4, apresenta-se a metodologia proposta para o problema em questão, descrevendo os principais tópicos da metodologia proposta para o problema *controle volt/var*. O Capítulo 5 mostra as simulações, os resultados e as análises obtidas a partir de sistemas exemplo e real de distribuição. Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros que resultam deste estudo. Na parte final da dissertação são apresentadas as referências bibliográficas citadas ao longo desta dissertação.

2. Controle de Tensão em Sistemas de Distribuição

O controle de tensão em sistemas de distribuição, na maioria das empresas, é realizado de forma não coordenada através dos operadores do sistema de distribuição baseado em estudos offline, utilizando uma carga prevista e condições topológicas prováveis de operação. Nos atuais sistemas de distribuição, onde existe uma tendência de operação em anéis e uma alta penetração de geração distribuída, este tipo de controle passa a não ser mais efetivo, à medida que as condições topológicas e de injeção de potência tendem a mudar durante o dia, bem como a possibilidade de gerenciamento de carga.

De acordo com a referência [Roytelman *et. Alli*, 1995] o *controle volt/var* é uma das funções mais importantes e vitais de um moderno DMS (Distribution Management System) [Green e Wilson, 2007].

As próximas seções apresentam conceitos gerais sobre operação e controle de redes de distribuição, bem como a estrutura e os dispositivos utilizados para realizar este controle.

2.1. Operação de Sistemas de Distribuição

Nesta dissertação o problema de controle de tensão/potência reativa tem o foco voltado para a operação de sistemas de distribuição de energia elétrica. Em função disso, torna-se necessária uma conceituação básica sobre operação de redes de distribuição.

Na operação convencional dos sistemas de distribuição, a maioria dos dispositivos de controle, proteção e chaveamento são manualmente operados ou têm controles locais ajustados através de simulações offline. Embora esta forma de operação venha funcionando satisfatoriamente ao longo dos anos, as modernas exigências regulatórias e econômicas, novas tecnologias como geração distribuída, microgrids e smart grids têm forçado a um investimento na automação dos sistemas de distribuição. Desta forma, apresenta-se inicialmente comentários

sobre conceitos de automação da distribuição e sobre os estados de operação de sistemas elétricos.

2.1.1. Automação da Distribuição

O conceito genérico de automação aplica-se ao conjunto formado pelo sistema SCADA, proteção e controle, infra-estrutura de comunicação e informação, bases de dados e aplicações computacionais para suporte à operação. Modernos conceitos de geração distribuída, microgrids [Hatziargyriou, 2005], Automatic Metering Reading juntam-se agora aos tradicionais sistemas de automação para constituir os smart-grid ou inteligrids. Na seção 2.2 é apresentado a forma como estes conceitos estão inseridos na hierarquia de controle de sistemas de distribuição.

Na prática, a automação da distribuição está centrada em dois termos em inglês utilizados pelo setor elétrico, DMS e DAS, descritos a seguir [Green e Wilson, 2007]:

- Distribution Management System DMS O sistema de gerenciamento da distribuição é um conjunto de funções computacionais para monitoração, análise e controle do sistema de distribuição instaladas no Centro de Operação do Sistema, as quais proporcionam ao operador condições de tomar decisões que mantenham a integridade do sistema, considerando aspectos de segurança e economia da operação. O DMS é fortemente apoiado por um conjunto de bases de dados, infra-estrutura de comunicação e tecnologia da informação. Um DMS pode ser modularmente descrito por quatro funções principais:
 - Gerenciamento das Operações do Centro de Controle Basicamente neste módulo estão as interfaces homem-máquina (IHM) que suportam os processos de monitoração, controle e de tomada de decisão dos operadores.
 - SCADA É a estrutura que permite ao DMS e aos operadores monitorar e controlar o sistema de distribuição em tempo real.
 - Aplicações Computacionais Neste módulo encontram-se as aplicações computacionais de simulação, análise e acompanhamento da operação, muitas vezes referenciadas como sistemas de auxílio à decisão, onde as mais comuns são:

- configurador;
- alocação de cargas;
- cálculo de faltas;
- minimização de perdas;
- simulador de manobras;
- controle volt/var;
- controle de intercâmbio de energia.
- Gerenciamento de Eventos O sistema de gerenciamento de eventos costuma ser referenciado pela sigla inglesa OMS Outage Management System, e é composto por uma série de funções e aplicativos, tais como, trouble call, localizador de faltas e despacho de equipes de manutenção. Além disso, esta função é responsável por criar e avaliar os planos de manobras, desligamentos e recomposição do sistema, gerando dados e análise consolidadas através de relatórios regulatórios sobre eventos programados e não-programados que acontecem no sistema.
- Distribution Automatic System DAS O chamado Sistema de Automação da Distribuição contém as camadas abaixo do DMS e inclui todos os equipamentos de monitoração e controle das redes e das subestações, tais como unidades terminais remotas, disjuntores e chaves automáticas, relés digitais, reguladores, religadores, transformadores com mudança automática de tap sob carga, banco de capacitores, entre outros, bem como todos os controles locais associados a estes dispositivos que permitem a monitoração e o acesso remoto, além de toda a infraestrutura de tecnologia de informação e comunicação associada.

Esta dissertação está centrada na fase do *Controle volt/var* do DMS e na fase de automação da distribuição que permite acionar remotamente em tempo real os dispositivos de controle de tensão (reguladores de tensão, transformadores com mudança de tap sob carga) e de fornecimento de reativos (geradores distribuídos e bancos de capacitores).

2.1.2. Estados de Operação

A operação de um sistema elétrico necessita manter um balanço entre segurança, economia, qualidade e confiabilidade do serviço, desde a fonte geradora até o ponto de entrega ao consumidor. A operação atual requer, além deste balanço baseado em aspectos técnicos, a necessidade de um balanço que contemple os aspectos das regras de mercado e regulação.

Embora os estados de operação propostos por Dy Liacco nos trabalhos "*The adaptive reliability control system*" [Dy Liacco, 1967] e "*Real time control of power systems*" [Dy Liacco, 1974] tenham seu foco voltado aos sistemas de geração e transmissão, suas idéias podem ser adaptadas aos sistemas de distribuição. A Figura 2-1 mostra os estados operativos propostos por Dy Liacco [1] [2] como descrito por Monticelli em [Monticelli, 1983].



FIGURA 2-1 – ESTADOS DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO [MONTICELLI, 1983].

A operação atual dos sistemas elétricos e a concepção dos Energy Management Systems – EMS foram fundamentalmente influenciados pelas idéias de Dy Liacco em relação à organização dos estados operativos de um sistema elétrico, chamados de normal, alerta, emergência e restaurativo. Esta classificação dos estados e as ações de transição associadas a eles foram fundamentais na concepção dos EMS e das funções de monitoração e controle suportadas pelo atual sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), e podem ser encontrados em detalhes nas referências [Monticelli, 1983; Dy Liacco, 1967; Dy Liacco, 1974].

Para atender os estados descritos na Figura 2-1, a operação de um sistema em regime permanente deve atender dois conjuntos de restrições [Monticelli, 1983]:

 as *restrições de carga*, relacionadas as equações do fluxo de potência, que representam as injeções de potência ativa e reativa (demanda do sistema) nos nós de carga e a injeção de potência ativa nos nós de geração, descrita pela expressão 2-1:

$$g(x) = 0 \tag{2-1}$$

onde g é uma função vetorial das variáveis de estado x.

as restrições de operação, relacionadas aos limites de tensão dos nós, carregamento (fluxo) nas linhas de transmissão e transformadores e limites de geração de potência ativa e reativa dos geradores. Estes limites são estabelecidos considerando as características de operação dos equipamentos para condições normais e em situação de emergência. O estabelecimento destes limites leva em conta, principalmente quando operando em situação de emergência, aspectos como duração da sobrecarga, condições de temperatura para resfriamento, tempo de operação do equipamento (vida útil), entre outros, tal que os limites nestas condições podem ser violados por períodos de tempo previamente avaliados (minutos ou horas), a fim de que auxiliem na operação do sistema e não causem danos aos equipamentos. As restrições de operação são representadas pela expressão 2-2,

$$h(x) \le 0 \tag{2-2}$$

onde h é uma função vetorial das variáveis de estado x.

Ao conjunto de restrições dado pelas expressões 2-1 e 2-2, pode ser adicionado um novo conjunto, chamado de:

Restrições de segurança, as quais estão relacionadas a um conjunto pré-selecionado de contingências mais prováveis, de primeira e segunda ordem, envolvendo perda de linhas e transformadores, conexão e desconexão de capacitores/reatores, perda de geração e corte de carga. De forma global, estas restrições são dadas pela expressão 2-3,

$$s(x) \le 0 \tag{2-3}$$

onde s é uma função vetorial que consiste em todas as restrições de carga e de operação, para cada uma das contingências selecionadas.

A metodologia desenvolvida nesta dissertação possui ação sobre as restrições de operação, representadas por restrições de igualdade e desigualdade, como mostra a expressão 2-3.

Para permitir que um Centro de Operação da Distribuição possa ser efetivo no cumprimento das restrições de operação e atenda ao conjuntos de estados de operação, é requerido que um Centro de Controle possa ser dividido em três grupos de funções:

- Planejamento da Operação Nesta fase são realizados os planejamentos de médio e curto prazo, isto é, os planejamentos que envolvem a programação mensal, semanal e diária. É importante que os métodos de previsão de carga possuam a melhor acuracidade possível, tanto para longo quanto para médio e curto prazo. Em um ambiente desregulamentado com preço da energia negociado através de contratos bilaterais e de mercado spot, onde a ultrapassagem de um contrato de fornecimento, por erro de previsão, pode originar penalidades por falta ou excesso, é fundamental que os operadores tenham perfeito controle sobre o comportamento da carga do seu sistema, pois erros em sua execução podem gerar prejuízos econômicos devido à violação de contratos e regulamentação, e a impactos sociais devido à necessidade de corte de carga para ajustar a segurança do sistema.
- Operação em Tempo Real A operação chamada de tempo real envolve um conjunto de funções balizadas pela programação diária e horária e pelo conjunto de informações monitoradas em tempo real no sistema. Este conjunto de funções está associado à

monitoração de tensões, correntes, fluxos de potência (ativo e reativo), níveis de carregamento, temperatura, etc. Estas variáveis são continuamente comparadas com limites contratuais e regulamentados, bem como com parâmetros que asseguram uma operação segura e econômica, como níveis de perdas e perfis de tensão. As variáveis que transgredirem, ou mesmo que se situem no limiar, podem resultar na transição de um estado seguro para um estado de alerta, por violações das condições de operação.

• Pós-Operação – Nesta fase as informações fornecidas pelo planejamento da operação e os dados monitorados na operação em tempo real do sistema devem ser consolidados e validados, a fim de realizar-se uma avaliação do desempenho da operação, isto é, se os dados originados na fase de programação da operação e os dados obtidos na fase de operação em tempo real apresentaram desvios e consistência. Na pós-operação também é realizada uma função chamada de análise *pós-mortem*, onde são determinadas as causas de distúrbios e seus impactos sobre os índices operativos do sistema. Vários dos relatórios gerados nesta fase são requisitos de aspectos legais e regulatórios, e seguem um padrão para permitir comparação entre a operação de diferentes sistemas.

O foco desta dissertação é uma metodologia para suporte às funções de auxílio à decisão de ações de controle de tensão, embutidas na fase de operação em tempo real, através da simulação e análise de coordenação de dispositivos de controle de tensão e geração de reativos que mantenham o sistema numa faixa de operação segura e que atenda a limites normatizados.

2.2. Hierarquia de Controle

A hierarquia de controle em sistemas de distribuição difere em termos de filosofia daquela de sistemas de transmissão devido, principalmente, a inexistência, ou fraca presença, de fontes ativas de geração de energia reativa com capacidade de controle, representadas por geradores síncronos. Entretanto, aos poucos, esta realidade está começando a mudar, pela presença de geração distribuída conectada diretamente em barramentos de subestações, em alta e média tensão, e ao longo dos alimentadores de média tensão que compõe os sistemas de distribuição.

Os microgrids também surgem como promissores no controle de tensão, atuando diretamente sobre os níveis de tensão da rede de baixa tensão.

Sistemas tradicionais de controle de tensão/potência reativa são baseados em estudos offline de previsão de carga e ajustes de parâmetros locais de controladores, baseados em referências fixas e pré-estabelecidas. Desta forma, não se garante um controle efetivo em termos de operação mais econômica e segura em todas as condições normais e de emergência.

A existência de um controle hierárquico na distribuição será tanto mais efetivo quanto for o nível de automação presente no sistema. As atuais filosofias de controle partem do princípio que a empresa dispõe de um centro de operação ou de centros de operação descentralizados com delegação de executar ações de controle sobre a rede. A Figura 2-2 apresenta uma hierarquia típica de controle de uma empresa, baseada no conceito de camadas [Green e Wilson, 2007].



FIGURA 2-2 - HIERARQUIA TÍPICA DE CONTROLE DE UMA EMPRESA [GREEN E WILSON, 2007].

Camada 1- *Empresa*: este é o mais alto nível das camadas e compreende todo o controle estratégico em nível de ativos, tecnologias de informações, contratos de compra e venda de energia, avaliação de reservas e previsão de demanda. Isto influencia diretamente as ações de planejamento e controle da operação que devem ser adotadas pelo centro de operação da empresa. Estão incluídos nesta camada os sistemas de informação corporativos (IS – Information Systems), os Sistemas de Informações dos Consumidores (CIS – Customers Information Systems) e os Sistemas de Informações Geo-referenciados (GIS – Geographical Information System).

Camada 2 – *Rede*: este nível de controle é diretamente monitorado e executado pelos operadores de sistema (ONS – no Brasil), sendo seus ajustes dependentes das funções de

despacho eletro-energético do sistema. As distribuidoras podem, de acordo com um planejamento prévio da operação, solicitar ajustes de tensão nos nós de interligação com a rede básica, a fim de ajustar o nível de tensão de seus sistemas, entretanto, esta ação é realizada de forma manual e via contato entre o Centro de Operação da distribuidora e o Centro de Operação do Sistema. Fazem parte desta camada os sistemas de gerenciamento de energia (EMS – Energy Management System) e da distribuição (DMS – Distribution Management System), apoiados pelo sistema SCADA (Supervisory Control and Data Aquisiction) e pelo sistema de gerenciamento de carga (LMS – Load Management System).

Camada 3 – *Subestação*: nesta camada de controle estão inseridos os controles dos disjuntores, chaves seccionadoras, LTCs, bancos de capacitores e relés de proteção, os quais são acessados através de UTR ou de IED. Este nível de controle compreende as subestações rebaixadoras da sub-transmissão e distribuição, sendo acessado pelo COD das empresas de distribuição.

Camada 4 – *Distribuição*: esta camada de controle abrange as redes de média tensão das distribuidoras e reflete, na sua efetividade, o nível de automação e capacidades de ações de controle em tempo real, através de ações locais e remotas sobre a rede e seus dispositivos localizados após a subestação. Nesta camada estão presentes as unidades de monitoração (DTU – Distribution Terminal Units), os dispositivos de monitoração digitais (IED – Intelligent Eletronic Devices) e o sistema de comunicação para acessar estes dispositivos.

Camada 5 – *Consumidor*: é a camada de interface entre a empresa distribuidora e o consumidor, constituindo a camada de mais baixo nível na hierarquia de controle. Esta camada está se tornando cada vez mais importante à medida que o sistema de distribuição passa a ser ativo e dinâmico, com alta penetração de GD e microgrids, suportados pela disponibilidade de AMR, as quais, combinadas com processos de TI permitem a flexibilização e customização de tarifas. Além disso, através de ações de DSM (Demand Side Management) é possível determinar importâncias e restrições de operação sobre determinados tipos de cargas e consumidores, constituindo uma possibilidade de controle

em condições nominais e de emergência. Nesta camada estão presentes as unidades de concentração de carga (LPU – Load Point Unit), os dispositivos de controle de carga (LCR – Load Control Devices) e os medidores automáticos de energia (AMR – Automatic Meter Reading), que apóiam as ações de medição, monitoração e controle desta camada.

A metodologia desenvolvida nesta dissertação atua sobre as camadas 3 e 4 da Figura 2-2.

2.3. Dispositivos Utilizados para Controle de Tensão/ Potência Reativa

Apresenta-se a seguir os principais dispositivos utilizados para controle de tensão e potência reativa em sistemas de distribuição. Também é apresentado um breve comentário sobre o funcionamento dos dispositivos.

2.3.1. Transformadores com Mudança de Tap sob Carga

Transformadores com mudança de tap sob carga (LTC) são comumente empregados nas subestações para manter um nível de tensão adequado no barramento de saída dos alimentadores.

Na metodologia proposta, este tipo de equipamento também será utilizado para controlar o nível de tensão dos nós ao longo dos alimentadores.

A mudança de tap deste equipamento pode ser feita tanto manualmente quanto automaticamente, controlando o fluxo de potência reativa que passa através do transformador.

Em [Bremermann, 2002] é apresentado o diagrama de blocos da modelagem desse equipamento que foi realizada através de modelos matemáticos de diversos elementos que compõem esse sistema [Calovic, 1984] [Kundur, 1983].

Do ponto de vista da metodologia proposta, este equipamento possui uma grande influência no controle de tensão dos alimentadores, pois sua potência e localização na rede de distribuição, que faz interface com a rede de transmissão, permite ter uma grande efetividade de controle sobre os nós dos alimentadores que derivam do barramento ao qual está conectado.

2.3.2. Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores são extensivamente usados em sistemas de distribuição como fontes de potência reativa. Eles têm sido tradicionalmente utilizados para a correção de fator de potência da rede e como dispositivos de controle de tensão em função de suas características. O efeito do banco de capacitores é corrigir o atraso imposto na corrente pela característica indutiva da rede e das cargas, como mostrado na Figura 2-3, melhorando o fator de potência e diminuindo a queda de tensão em função da diminuição da corrente injetada pela fonte (subestação) no sistema. Esta característica do banco de capacitores é similar ao comportamento de um compensador síncrono sobre-excitado.



FIGURA 2-3 - DIAGRAMA FASORIAL COMO EFEITO SOBRE A TENSÃO SEM (A) E COM (B) A INSERÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES.

2.3.3. Reguladores de Tensão

O regulador de tensão é muito utilizado em redes de média tensão para ações de regulação de tensão, uma vez que não existe mudança de nível de tensão entre o nó primário e o nó secundário do regulador de tensão. Existe apenas pequenos ajustes no módulo da tensão proporcionado pela troca de tap.

Tipicamente o regulador de tensão ajusta a tensão em +/- 10% em 32 degraus, cada um representando 5/8 de mudança na tensão. Isto é realizado dividindo-se o enrolamento série em 8 partes iguais, cada um representando 1/8 de mudança na regulação de 10% na tensão. A tensão terminal é conectada no tap central de um reator conectado associado com o mecanismo de mudança de tap. Isto gera um efeito adicional que divide cada passo em duas partes iguais, dando um total de 16 passos de 5/8% cada. A tensão induzida no enrolamento série é adicionada

ou subtraída da tensão primária, dependendo da polaridade do enrolamento série. Uma chave de controle que permite a reversão (RS) é disponível para mudar esta polaridade. A magnitude da tensão de saída do enrolamento série é variada pela mudança na posição do tap, a qual é executada sob carga, disponibilizando uma variação de +10% para incrementar a tensão ou -10% para diminuir a tensão, em um total de 32 taps, como mostra a Figura 2-4.



FIGURA 2-4 - ESQUEMÁTICO DO AJUSTE DE TAP NO COMUTADOR TIPO REATÂNCIA COM CHAVE REVERSORA E ENROLAMETO EQUALIZADOR [HARLOW, 2004].

O enrolamento comum ao primário e ao secundário é projetado como um enrolamento em paralelo, e o enrolamento não comum ao primário e ao secundário é projetado como um enrolamento série. O enrolamento série disponibiliza uma regulação de 10% da tensão aplicado sob o regulador. Como descrito anteriormente, a polaridade deste enrolamento é mudada para aditiva ou subtrativa através de uma chave seletora para acompanhar a necessidade de aumento (boost) ou diminuição (buck) no nível de tensão. Os reguladores são projetados e construídos seguindo dois padrões básicos, chamados de Tipo A e Tipo B [IEEE Std. C57.15, IEEE Standard Requirements, Technology, and Test Code for Step-Voltage Regulators].

No regulador de tensão Tipo A, a regulação de tensão é executada no lado da carga, como mostra a Figura 2-5. A excitação do núcleo varia com a tensão da fonte, dado que o enrolamento paralelo é conectado através do circuito primário do regulador.



FIGURA 2-5 - REGULAÇÃO DE TENSÃO TIPO A [HARLOW, 2004].

No regulador de tensão do Tipo B, Figura 2-6, a regulação é executada no lado da carga e a fonte de tensão é aplicada sobre o enrolamento série. Eles são construídos tal que o circuito primário (fonte de tensão) é aplicado sob os taps do enrolamento série do regulador, o qual é conectado ao lado da fonte do regulador. Devido a sua construção, o Tipo B possui a excitação do núcleo constante, desde que o enrolamento paralelo é conectado através do circuito regulado. Um enrolamento de controle localizado no mesmo núcleo, como os enrolamentos série e paralelo, é usado para disponibilizar a tensão para a mudança de tap e para o controle do regulador.



FIGURA 2-6 - REGULAÇÃO DE TENSÃO TIPO B [HARLOW, 2004].

Para regular a tensão, ocorre uma troca entre tap dos enrolamentos série do autotransformador. Esta troca de posição do tap é determinada por um circuito de controle,

chamado de compensador de queda de tensão de linha, mais conhecido pela sigla LDC, abreviatura do termo inglês *Line Drop Compensator*, mostrado na Figura 2-7.



FIGURA 2-7 – REGULADOR DE TENSÃO LDC [HARLOW, 2004].

O circuito de controle do regulador de tensão possui os seguintes ajustes que necessitam ser parametrizados:

- Nível de tensão (voltage level) é o nível de tensão que se espera que o regulador seja capaz de manter em um nó de referência, chamado de centro de carga. O centro de carga pode ser o nó terminal do regulador de tensão ou um nó remoto do alimentador.
- Largura da banda (bandwidth) este parâmetro, também chamado de banda morta, é ajustado para permitir que a tensão possa variar dentro de um intervalo sem que haja atuação do controle de mudança de tap. O nível de tensão que deve ser mantida no centro de carga varia de +/- 1,5 a 2% da banda morta ajustada.
- Atraso de tempo (time delay) é o tempo de espera para a execução de uma operação de aumento ou diminuição de tap. Este tempo é ajustado para prevenir mudanças de tap desnecessárias que poderiam ocorrer durante transitórios do sistema ou devido a mudanças rápidas de corrente. O atraso de tempo para a mudança do primeiro tap é na ordem de 30 a 60s, sendo o ajuste típico 30s. [CATÁLOGO DO REGULADOR].
- Compensador de queda de tensão de linha (Line Drop Compensator) também conhecido pela sigla LDC, este parâmetro compensa a queda de tensão entre o regulador e o centro de carga. O ajuste consiste na parametrização dos valores de R

(resistência) e X (reatância) em termos de tensão (volt), equivalente à impedância que o regulador vê entre o seu nó terminal e um ponto considerado como centro de carga. Estes ajustes podem ser zero se o regulador trabalhar com a lógica de regular a tensão tomando como referência a tensão terminal no nó onde estão conectados seus terminais de saída.

O tempo gasto pelo mecanismo de troca de tap para cada mudança adicional, após a primeira troca, situa-se entre 2 a 8 segundos, sendo 6 segundos um valor típico. Portanto, a mudança da posição neutra até a posição máxima ou mínima acontece em um intervalo de aproximadamente 2 minutos.

2.3.4. Gerador

Em redes de distribuição tradicionais não se costumava ter geradores conectados (operando em paralelo) com o sistema. Geralmente, a presença de geradores estava associado à co-geração em empresas para modulação da demanda ou operação de emergência, e na maioria das vezes as empresas distribuidoras não tinham interesse em operar estes geradores em paralelo por alegadas questões de segurança. Com o advento da mudança da Legislação do Setor Elétrico e o surgimento do conceito de geração distribuída e produtores independentes de energia, os geradores passaram a ser um importante elemento no controle de tensão de sistemas de distribuição.

Os geradores síncronos podem gerar ou absorver potência reativa dependendo do ajuste da excitação. Quando operam sobreexcitados eles fornecem reativos à rede e quando operam sobreexcitado eles absorvem potência reativa da rede. Esta capacidade de prover uma regulação contínua da tensão torna o gerador adequado para fazer parte de esquemas de controle de tensão, à medida que permitem um ajuste "fino" de aumento ou diminuição da tensão e da produção de potência reativa do sistema. Para efeito da sua utilização neste trabalho como um elemento de regulação de tensão, será utilizado seu modelo estático para estudos de fluxo de potência, como descrito na seção 4.4.1.
2.4. O Controle volt/var

Em função da impedância dos condutores das redes de distribuição e da corrente que circula em função das cargas conectadas, existe uma queda de tensão ao longo dos alimentadores que compõem o SD. À medida que a demanda é incrementada, devido a variações diárias e/ou sazonais da curva de carga dos consumidores, existirá um comportamento de queda ou aumento da tensão acompanhando a variação da corrente de carga. Um fator significante neste comportamento se relaciona com o fator de potência das cargas, e por conseqüência, da rede de distribuição, uma vez que um fator de potência baixo acarretará um comportamento de queda de tensão mais acentuada na rede.

Para manter o perfil de tensão da rede de distribuição dentro dos limites admissíveis, algumas ações podem ser executadas [Gönen, 2008]:

- 1. uso de geradores distribuídos para regulação da tensão;
- 2. instalação de transformadores com mudança de tap sob carga;
- 3. banco de capacitores no barramento da subestação;
- 4. balanceamento de carga nos alimentadores de média tensão;
- 5. incremento na bitola dos condutores do alimentador;
- 6. incremento do número de fase e divisão da carga, quando se tratar de alimentadores monofásicos ou bifásicos;
- 7. transferência de carga para novos alimentadores;
- 8. instalação de novas subestações e alimentadores;
- 9. incremento no nível de tensão primária dos alimentadores;
- 10. instalação de reguladores de tensão nos alimentadores;
- 11. instalação de banco de capacitores paralelos nos alimentadores;
- 12. instalação de capacitores série nos alimentadores.

A seleção de uma ou mais opções depende do sistema e da intensidade dos problemas, e deve ser cuidadosamente avaliada na fase de planejamento da expansão, a fim de levar em conta uma previsão futura de crescimento e comportamento sazonal da carga, bem como a avaliação técnica-econômica de cada opção e do seu reflexo sobre o sistema.

As ações apresentadas são todas típicas de planejamento. Nesta dissertação o foco é tratar a operação do sistema, portanto, parte-se do pressuposto que todas as ações de planejamento já tenham sido executadas, e o que se dispõe para melhorar o perfil de tensão da rede são os equipamentos de regulação de tensão e geração de reativos, representados por:

- 1. Transformadores com mudança de tap sob carga LTC;
- 2. Reguladores de tensão;
- 3. Geradores distribuídos;
- 4. Banco de capacitores paralelos.

A Figura 2-8, ilustra o efeito dos equipamentos de controle de tensão sobre o perfil de tensão.



FIGURA 2-8 – EFEITO DOS DISPOSITIVOS DE CONTROLE SOBRE O PERFIL DE TENSÃO.

Apresenta-se no próximo capítulo alguns tópicos importantes no entendimento da teoria da *lógica fuzzy* que é onde se baseiam os *controladores fuzzy de tensão*.

3. Lógica Fuzzy

Este capítulo apresenta uma revisão de *lógica fuzzy*, baseada nas referências [Fuzzy Logic Toolbox, 1995], [El-Hawary, 1998] e [Shaw e Simões, 1999], com o objetivo de auxiliar no entendimento da aplicação fuzzy no controle de tensão e de como os controladores utilizados funcionam. Serão apresentados, de forma resumida, os principais conceitos relacionados ao estudo da *lógica fuzzy*.

3.1. Conceito

Lógica fuzzy, também chamada de lógica difusa ou lógica nebulosa, envolve um estudo sobre a importância relativa da precisão. Na vida real muitas informações são imprecisas. Por exemplo, se fossemos a rua perguntar para as pessoas a partir de qual valor elas consideram um determinado produto caro, teríamos respostas com diferentes valores. Na lógica clássica, valores limiares dos conjuntos são bem definidos. O que não ocorre na lógica fuzzy. Desta forma é possível enfrentar situações mais complexas e dinâmicas, que são melhor caracterizadas por palavras e não por números. Muitos livros sobre esse assunto começam com frases de algumas grandes mentes [Fuzzy Logic Toolbox, 1995].

Henri Matisse:

"Sometimes the more measurable drives out the most important."

• René Dubos:

"Vagueness is no more to be done."

• Charles Sanders Peirce:

"I believe that nothing is unconditionally true, and hence I am opposed to every statement of positive truth and every man who makes it."

• Albert Einstein:

"As complexity rises, precise statements lose meaning and meaningful statements lose precision."

Em [Fuzzy Logic Toolbox, 1995] há um bom exemplo sobre a diferença de precisão e significado, como mostra a Figura 3-1.



FIGURA 3-1. DIFERENÇA ENTRE PRECISÃO E SIGNIFICADO [FUZZY LOGIC TOOLBOX, 1995].

A criação da *lógica fuzzy* se deu na necessidade de se obter uma metodologia capaz de expressar, de uma maneira sistemática, quantidades imprecisas, vagas, mal definidas. Operadores humanos podem trabalhar com processos não completamente compreendidos e sistemas com dinâmica não conhecida. Esses operadores sabem qual decisão tomar a partir de certas observações. Assim, a vantagem de controladores inteligentes é permitir que regras heurísticas possam capturar estratégias de controle de operadores humanos, fazendo com que a ação de controle seja tão boa quanto, ou ainda melhor que a deles, e sempre consistente. Dessa forma, torna-se possível automatizar controles antes executados manualmente, incorporando o conhecimento à modelagem matemática do processo [Shaw e Simões, 1999].

A característica especial de *lógica fuzzy* é a de representar o manuseio de informações imprecisas. Ela provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana, em valores numéricos. Com o enfoque no *Controle volt/var*, a *lógica fuzzy* resulta em fazer com que a experiência dos operadores possa ser

integrada a ferramentas computacionais, possibilitando a criação de estratégias de tomadas de decisão para problemas complexos, dinâmicos, multiobjetivos [Shaw e Simões, 1999].

3.2. Conjuntos Fuzzy

Zadeh foi quem introduziu o conceito de conjuntos *fuzzy* em 1965 como um significado matemático de descrever incertezas em lingüística. A idéia pode ser considerada como uma generalização da teoria clássica dos conjuntos [El-Hawary, 1998].

Um conjunto *fuzzy* é um conjunto sem um limite claramente definido. Nele podem existir elementos que contenham um grau parcial para serem membros do conjunto. A Figura 3-2 mostra um conjunto clássico que é bem definido e contém os dias da semana, excluindo os elementos que não são dias da semana.



Nos conjuntos *fuzzy* existem elementos que fazem parte 100% do conjunto, elementos que não fazem parte do conjunto (0%) e elementos que têm certo grau de pertinência em relação a este conjunto. Por exemplo, o conjunto de dias do fim de semana, como mostra a Figura 3-3.



FIGURA 3-3. CONJUNTO FUZZY.

Todas as pessoas concordam que domingo e sábado fazem parte do conjunto de dias do fim de semana, mas e quanto à sexta-feira?

Nesse caso, os elementos devem receber um grau de pertinência e, este é determinado em um intervalo de [0,1]. Por exemplo: sábado é um dia de fim de semana logo seu grau de pertinência poderia ser igual a 1 (100%). Quarta-feira não é um dia de fim de semana e seu grau de pertinência deve ser 0 (0%). No entanto, sexta-feira para uns é quase que um dia de fim de semana e portanto poderia receber um grau de pertinência igual a 0,85. Assim como domingo pode ser considerado como quase um dia de semana, afinal ele já não representa um dia de fim de semana como o sábado e poderia receber um grau de pertinência igual a 0,9. Vimos então que na teoria de conjuntos *fuzzy*, os elementos devem ter graus de pertinência para que possam ser avaliados.

Uma definição apropriada é mostrada em [Shaw e Simões, 1999]:

seja *E* um conjunto e *x* um elemento de *E*; então, o subconjunto *A* de *E* é um conjunto de pares ordenados:

$$\{x, \mu_A(x)\}, \quad \forall x \in E$$
 3-1

onde $\mu_A(x)$ é o grau de pertinência de *x* em *A*.

Se $\mu_A(x)$ tem seus valores em um conjunto *M*, chamado por conjunto de pertinência, pode-se afirmar que *x* tem seus valores em *M* através da função $\mu_A(x)$:

$$x \xrightarrow{\mu_A(x)} M$$

Essa função é chamada de *função de pertinência*. Se $M = \{0,1\}$, o subconjunto A é tomado como um conjunto bivalente e a função $\mu_A(x)$ será a função booleana. Se M = [0,1], o subconjunto A é um conjunto *fuzzy* e a função $\mu_A(x)$ será uma função de pertinência *fuzzy*. Assim, um vetor de pertinência seria definido como:

$$A = \{\mu_1(x), \mu_2(x), \dots, \mu_n(x)\}$$
3-2

Um conjunto é completamente definido por seu vetor de pertinências. Isto é, para determinar um conjunto é suficiente se calcular os valores individuais de seu vetor de pertinência [Shaw e Simões, 1999].

3.3. Universo de discurso

Os elementos de um determinado conjunto sempre irão pertencer a um dado *universo de discurso*. Matematicamente, o *universo de discurso* é um conjunto de valores finitos, onde qualquer outro conjunto seria um subconjunto do *conjunto universo de discurso*. Em engenharia, os conjuntos *fuzzy* são denominados como *universo de discurso contínuo*, simplificando o tratamento [Shaw e Simões, 1999].

Em outras palavras o *universo de discurso* contém todos os possíveis valores que um elemento, pertencente a um subconjunto do *universo de discurso*, pode assumir.

3.4. Subconjuntos Fuzzy

Um conjunto *fuzzy* é caracterizado por seu vetor de pertinência, e estes são multivalentes dentro do intervalo numérico [0,1]. Os graus de pertinência podem ser considerados como

medidas que expressam a possibilidade de um dado elemento fazer parte ou não de um conjunto *fuzzy*.

Sendo *E* o *universo de discurso*, pertencente ao conjunto dos reais, e os vetores de pertinência $A \subset E$, $B \subset E$ e M[0,1], onde *M* é o conjunto dos valores de pertinência de todos os conjuntos, então $A \subset B$ para todo elemento *x* se:

$$\mu_A(x) \le \mu_B(x) \tag{3-3}$$

ou seja, A está contido em B se o valor de pertinência de cada elemento $x \in E$ em A for menor ou igual ao correspondente valor de pertinência $x \in E$ de B.

3.5. Operações de Conjuntos

As operações básicas dos conjuntos são: complemento, união e intersecção. A Figura 3-4, mostra essas operações através do conhecido diagrama de Venn. A parte hachurada em cinza representa tais operações.



FIGURA 3-4. OPERAÇÕES BÁSICAS DE CONJUNTOS UTILIZANDO DIAGRAMA DE VENN.

3.6. Números Fuzzy

Os números fuzzy são constituídos por conjuntos fuzzy, definidos em universos de discursos que podem ser contínuos ou discretos. Os números fuzzy quantificam a incerteza e/ou imprecisão associada a uma determinada informação. Informações do tipo "...em torno de 90kg...", "aproximadamente 1000", podem ser entendidas por números fuzzy.

Considere a Figura 3-5, observe o número zero no eixo horizontal, o eixo vertical é unitário e bem definido. Zero é um número real e pode ser considerado como um conjunto onde seus membros pertençam por completo ou não sejam membros de forma alguma. Tal conjunto pode ser chamado de ZERO, ou seja, todos os números do eixo horizontal pertencem ao conjunto ZERO ou não pertencem.



FIGURA 3-5. NÚMERO REAL, CONJUNTO ZERO.

No entanto, na Figura 3-6, observa-se um novo conjunto chamado de QUASE ZERO, o qual tem uma área finita, abrangendo uma cobertura maior no eixo horizontal.



FIGURA 3-6. NÚMERO FUZZY, CONJUNTO QUASE ZERO.

Na Figura 3-7, verifica-se um conjunto chamado de PRÓXIMO DE ZERO, que é um pouco mais alargado que o conjunto QUASE ZERO. De outra forma, os números *fuzzy* podem ser considerados números reais com graus de pertinência.



FIGURA 3-7 - NÚMERO FUZZY, CONJUNTO PRÓXIMO DE ZERO.

Matematicamente, pode-se representar o número x(0), da seguinte forma:

X deve ser unitário:
$$\max \mu_x(u) = 1, u \in U$$
 3-4

Isto significa que para qualquer elemento $u \in U$, o máximo valor da função de pertinência no eixo vertical, será 1.

X deve ser convexo:
$$\mu_{X} [\lambda u_{1} + (1 - \lambda)u_{2}] \ge \min[\mu_{X} (u_{1}), \mu_{X} (u_{2})]$$

para $u_{1}, u_{2} \in U, \lambda \in [0, 1]$ 3-5

A convexidade carrega a informação sobre a conectividade interior e o formato do número *fuzzy*. A convexidade previne situações como "buracos" e "baías" nos limites. Funções de pertinência não-convexas não possibilitam unicidade na avaliação numérica do valor no eixo horizontal.

3.7. Funções de pertinência

Uma *função de pertinência fuzzy* é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso. Vale lembrar que o universo de discurso de uma variável é um intervalo numérico real que uma variável pode assumir.

No caso da lógica clássica, a pertinência ou não pertinência de um elemento x a um conjunto A qualquer, é descrita pela função de pertinência $\mu A(x)$, em que:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, se \ x \in A \\ 0, se \ x \notin A \end{cases}$$
3-6

Esta função está definida para todos elementos do universo de discurso. A função de pertinência faz um mapeamento do universo U, da seguinte forma:

$$\mu_A(x): U \to \{0,1\}$$
 3-7

A Figura 3-8, mostra duas funções de pertinência *fuzzy* mais comumente encontradas: triângulo e trapézio.



FIGURA 3-8 - EXEMPLO DE FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.

Estes tipos de funções são geradas com facilidade, mas não necessariamente são apenas essas as funções utilizadas, outros tipos de funções podem ser usadas de acordo com a necessidade do problema. As funções de pertinência não precisam ser simétricas ou mesmo igualmente espaçadas, sendo que cada variável pode ter diferentes funções de pertinência. A Figura 3-9 mostra funções de pertinência triangulares não simétricas e desigualmente espaçadas.



FIGURA 3-9 - FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA NÃO SIMÉTRICAS.

onde:

- MN = muito negativo;
- N = negativo;
- $PN = pouco \ negativo;$
- ZE = zero;
- $PP = pouco \ positivo$;
- P = positivo;
- MP = muito positivo.

3.8. Intersecção de conjuntos Fuzzy

Seja *E* o universo de discurso e $x \in E$, M = [0,1]; Sejam os conjuntos $A \subset B$, $A \subset E$, então a intersecção $A \cap B$ é o maior subconjunto do universo de discurso *E*, o qual é também parte de *A* e *B*. A intersecção é a parte comum de *A* e *B* e é sempre menor que qualquer um dos conjuntos individuais *A* e *B*. Logo, o vetor de pertinência da intersecção $A \cap B$ é calculado dos valores individuais de *A* e *B*, da seguinte forma:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$
 3-8

3.9. União de conjuntos Fuzzy

Seja *E* o universo de discurso, $x \in E$, *com* M = [0,1] e os *conjuntos fuzzy*, $A \subset E, B \subset E$. A união $A \cup B$ é o menor subconjunto do universo de discurso *E*, que inclui ambos os conjuntos *fuzzy A* e *B*. A união é o contorno dos *conjuntos fuzzy A* e *B*, sendo maior que qualquer um dos conjuntos individuais *A* e *B*. Assim, o vetor de pertinência de união, é calculado dos valores individuais de *A* e *B*, da seguinte forma:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$
 3-9

3.10. Operadores de intersecção Fuzzy

A função de pertinência da intersecção $A \cap B$ é representada pela função de pertinência $\mu_{A \cap B}(u), u \in U$, podendo ser definida ponto a ponto por:

$$\mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \mathbf{t} \ \mu_B(u) \le \min[\mu_A(u), \mu_B(u)]$$
3-10

onde **t** é a norma triangular, ou *norma-t* de uma intersecção generalizada. A *norma-t* é uma função de duas entradas definida nos domínios $\mathbf{t}:[0,1] X [0,1] \rightarrow [0,1]$, onde "X" denota o operador de produto cartesiano. O *operador-t* indica um mapeamento entre duas *funções de pertinência fuzzy*, cada uma no intervalo [0,1]; a *operação-t* é executada entre elas, de acordo

com seu formato, ponto a ponto. Tal função de mapeamento deve satisfazer algumas condições, tais como:

• Condições de contorno para,

$$x \mathbf{t} 0 = 0, \forall u \in [0,1]$$
 3-11

ou seja, a intersecção de qualquer conjunto com um conjunto vazio, resulta no próprio conjunto vazio;

• Condições de contorno para,

$$x \mathbf{t} \mathbf{1} = x, \forall u \in [0,1]$$
 3-12

a intersecção de qualquer *conjunto fuzzy* com um conjunto universal, resulta no conjunto por si só.

3.11. Operadores de união Fuzzy

A função de pertinência $\mu_{A \cup B}(u), u \in U$, da união $A \cup B$, pode ser definida ponto a ponto por:

$$\mu_{A\cup B}(u) = \mu_A(u) \mathbf{s} \ \mu_B(u) \le \max[\mu_A(u), \mu_B(u)]$$
3-13

onde *s* é a co-norma triangular de uma união generalizada. A *norma-s* é uma função de duas entradas definida nos domínios $s:[0,1] X [0,1] \rightarrow [0,1]$, onde "X" denota o operador de produto cartesiano. O *operador-s* indica um mapeamento entre duas *funções de pertinência fuzzy*, cada uma delas no intervalo [0,1]. A *operação-s* é executada, de acordo com seu formato, ponto a ponto. Tal função de mapeamento deve satisfazer algumas condições, tais como:

• Condições de contorno para,

$$u \mathbf{s} 0 = u, \forall u \in [0,1]$$
 3-14

ou seja, a união de qualquer conjunto com o conjunto vazio, resulta no próprio conjunto.

• Condições de contorno para,

$$u \mathbf{s} \mathbf{1} = \mathbf{1}, \forall u \in [0, 1]$$
 3-15

a intersecção de qualquer *conjunto fuzzy* com um conjunto universal, resulta no conjunto universal.

3.12. Projeto de um sistema fuzzy

A Figura 3-10 apresenta o processo pelo qual o espaço de entrada é submetido quando mapeado para um espaço de saída através de um sistema *fuzzy*. O espaço de entrada, ou seja, as variáveis de entrada, sofrem três transformações até formarem um espaço de saída. Primeiro, sofrem o processo de fuzzyficação que utiliza funções de pertinência definidas e mapeia cada variável do espaço de entrada. Depois, o mapa de regras é consultado, combinando graus de pertinência para formar as variáveis de saída. E por último é efetuada a desfuzzyficação, que também utiliza funções de pertinência, para calcular as saídas do sistema.



FIGURA 3-10. DIAGRAMA DO PROCESSO DE UM SISTEMA FUZZY.

3.13. Fuzzyficação

É um mapeamento do domínio dos números reais para o domínio *fuzzy*, ou seja, é o processo de se calcular um valor para representar o grau de pertinência de um espaço de entrada, em um ou mais *conjuntos fuzzy*. Representa a atribuição de valores lingüísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por tais funções de pertinência. A Figura 3-11, mostra a variável de entrada, *tensão*, de um sistema, com *conjuntos fuzzy* do tipo: *baixa, nominal, alta*.

Observa-se que o valor de 0,93 da variável de entrada *tensão* pode ser considerada como parte do conjunto *baixa* ou *nominal*, mas tem maior grau de pertinência para *baixa*.

O processo de *fuzzyficação* permite que os termos lingüísticos façam sentido para os computadores, isto é, transforma valores qualitativos em valores quantitativos.



FIGURA 3-11 - CONJUNTOS FUZZY PARA O ESPAÇO DE ENTRADA, VIOLAÇÃO DE TENSÃO.

3.14. Desfuzzyficação

A variável lingüística de saída, resultado das regras *fuzzy*, deve ser *desfuzzyficada* para ser entendida no mesmo universo da ação de controle. É uma transformação inversa que traduz o domínio *fuzzy* para o domínio desejado. Existem alguns métodos de *desfuzzyficação*, tais como:

- Centro-da-Área (C-o-A);
- Centro-do-Máximo (C-o-M);
- Média-do-Máximo (M-o-M).

Neste estudo foi aplicado aos controladores de tensão *fuzzy* o método de *desfuzzyficação centro-da-área*. Também chamado por *centróide*, este método consiste em achar um ponto *centróide* no eixo horizontal para cada função de pertinência de saída. Então as áreas das funções de pertinência são calculadas, considerando que através das regras aplicadas, as *funções de pertinência* são limitadas no eixo vertical. Finalmente, a saída é *desfuzzyficada* através da média ponderada dos pontos *centróides* do eixo horizontal e as áreas calculadas, com as áreas servindo como pesos. Este método é ilustrado na Figura 3-12.



FIGURA 3-12 - MÉTODO CENTRO-DA-ÁREA [SHAW E SIMÕES, 1999].

3.15. Regras Fuzzy

As regras heurísticas são utilizadas para a modelagem de sistemas de controle. Consiste em realizar uma tarefa de acordo com a experiência prévia, com regras práticas e estratégias freqüentemente utilizadas. Uma regra heurística é uma implicação lógica na forma:

ou então em uma regra típica de controle,

$$SE < condição > ENTÃO < ação > 3-17$$

Regras associam conseqüências com condições. No método heurístico constrói-se uma tabela de entradas e saídas. As condições, também são conhecidas como *antecedentes*, assim como as conseqüências são chamadas de *conseqüentes*.

No caso fuzzy, uma linha de regra heurística pode se escrever da seguinte maneira:

SE
$$X_{in} = BAIXO ENTAO X_{out} = GRANDE$$
 3-18

onde BAIXO e GRANDE são definidos através de *funções de pertinência* que descrevem a imprecisão de tais valores de entrada e saída.

Pode-se notar que em vez de uma expressão numérica, foi utilizada uma expressão lingüística para descrever a relação entre a variável de entrada e a de saída. Isto torna as regras, do ponto de vista humano, bastante intuitivas.

3.16. Controladores Fuzzy

A utilização de controle inteligente não deve ser tratado como "a solução para todos os problemas". Se o sistema a ser controlado não é completamente linear, porém a não linearidade entre a entrada e a saída é uma função suave, sem descontinuidades, ou se apesar do processo ser não linear ele operar em um ponto de operação, em torno do qual variações pequenas são lineares, a solução com controladores PID ou com Controlador Lógico Programável (CLP) operando na função PID é, ainda, uma excelente solução [Shaw e Simões, 1999].

Devido ao fato dos controladores PID serem de entrada única e saída única e a maioria dos processos serem multivariáveis por natureza, verifica-se que cada variável controlada necessita de seu próprio controle e valor de referência. Daí a necessidade de um controle supervisório, capaz de ajustar os valores de referência de um sistema com muitas malhas de controle [Shaw e Simões, 1999]. Há diversos casos em que a mudança de valores de referência deve ser feita baseada em decisões tomadas pela observação das saídas de processos, tarefa tipicamente realizada por operadores humanos. Além disso, é muito freqüente que processos possuam dinâmica, sofrendo variações nos seus parâmetros e dessa forma fazem com que o ponto de operação se desloque. Nesse caso os controladores PID não conseguem fornecer um desempenho satisfatório.

Os controladores *fuzzy* têm por característica a habilidade em se executar controle multiobjetivos, mesmo com requisições conflitantes, de forma a se obter um bom compromisso na estratégia de controle.

Os controladores efetuam um mapeamento de um espaço de entrada para um espaço de saída e este é efetuado através de um *sistema de inferência fuzzy*. Há dois tipos de *sistemas de inferência fuzzy* que são mais utilizados. O primeiro, utilizado neste estudo, é o sistema de inferência do tipo *Mamdani* [Mamdani, 1975]. O segundo é o sistema de inferência do tipo *Sugeno* [Sugeno, 1985].

O sistema de inferência do tipo *Mamdani* é responsável pela combinação dos dados de entrada, já *fuzzyficados*, com as *regras fuzzy* existentes, as quais descrevem o processo de tal forma que se obtenha o valor de saída que deverá ser *desfuzzyficado*.

4. Metodologia proposta

A complexidade das características dos sistemas de energia elétrica vem crescendo de forma bastante acelerada, seja pela entrada da geração distribuída, por níveis de operação e segurança que devem ser mantidos, por níveis de continuidades que devem ser atendidos, pelas variações dos tipos de carga que o sistema deve suportar, etc. As ações de tomada de decisão feitas, ainda, por operadores do sistema elétrico de potência são baseadas em características e "sentimentos" que não correspondem, hoje, a complexidade do sistema. Tais decisões podem causar desgaste dos equipamentos, violação dos níveis de segurança, bem como não serem eficazes e nem consistentes.

Os estudos mostram que o controle de tensão e potência reativa do sistema elétrico em redes de cenário complexo deve dispor, cada vez mais, de ferramentas inteligentes que servem de auxílio ao operador.

A metodologia desenvolvida nessa dissertação está baseada na teoria de controle fuzzy combinada com ferramentas de configuração e fluxo de potência para redes de distribuição e é uma extensão dos métodos desenvolvidos por [Miranda *et. Alli*, 2007; Miranda e Calisto, 2002].

Após a identificação de violação de tensão, é construída uma Matriz Efetividade, ou seja, é a efetividade de controle que cada dispositivo possuí em cada nó do SD referente ao outro dispositivo. Baseada nesta matriz, a metodologia identifica qual dispositivo de controle é mais efetivo para o nó de pior violação de tensão. Desta forma, o programa deve corrigir ou melhorar a tensão no nó de pior violação e conseqüentemente em outros nós que também são, de maneira menos eficaz, atingidos pelas mudanças efetuadas em determinado dispositivo de controle. Isto significa que, para uma dada ação de controle, não apenas o nó diretamente em questão será afetado e sim mais nós do SD. Também é possível acontecer que a ação efetuada em determinado nó, tenha como conseqüência uma violação de tensão em outro nó que em princípio não estava violado, mas provavelmente a beira da violação. Caso isso ocorra, esse nó irá entrar para o conjunto de nós com violação de tensão na próxima vez que o algoritmo verificar se todos os nós se encontram no intervalo desejado atribuído à faixa de regulação. Dessa forma, o

- 58 -

algoritmo só pára quando todas as tensões estiverem dentro do intervalo adequado e préestabelecido de operação, ou porque não há mais dispositivos de controle para efetuar tais ações.

O método proposto procura regular o nível de tensão do SD, coordenadamente, utilizando como dispositivos de controle o transformador ULTC e o banco de capacitores da subestação, os reguladores de tensão e os bancos de capacitores alocados ao longo dos alimentadores. Foi implementado para este fim, um fluxo de potência que comporta redes malhadas e entrada de geração distribuída, o que é uma realidade atual do SD. Também foi implementado o algoritmo de controle que recebe as informações do sistema e apresenta as ações de controle a serem tomadas. Os algoritmos foram implementados em MATLAB, pois este programa apresenta uma interface fácil de utilizar em problemas de engenharia e possui funções próprias para estes problemas.

Para modelar os controladores foi utilizado o Fuzzy Logic Toolbox do Matlab [Fuzzy Logic Toolbox, 1995]. O algoritmo pode ser usado em nível de planejamento e operação, dando suporte aos operadores em suas tomadas de decisões de ação de controle. É neste último nível que este Capítulo se baseia.

A Figura 4-1 mostra um fluxograma do sistema de controle proposto e servirá de orientação para as seções que seguem. Este fluxograma tem quatro etapas:

- (0) fluxograma geral do algoritmo;
- (1) construção da matriz efetividade;
- (2) execução da cascata de controladores tipo Mamdani;
- (3) execução da ação de controle.



FIGURA 4-1 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE CONTROLE VOLT/VAR.

4.1. Matriz Efetividade

O problema de controle de tensão em alimentadores está associado com a mudança da posição do tap dos LTC e dos reguladores LDC, bem como do status de operação dos bancos de capacitores. Essas são ações discretas, embora algumas metodologias considerem uma simplificação e admitam a mudança de tap como uma variável contínua. O fato é que o cálculo da sensibilidade através de variações infinitesimais não é adequado para tratar o problema de obtenção de um índice de efetividade do controle quando são empregados dispositivos de controle que possuam grandes variações, como descrito em [Martins, 2006].

Dessa forma, a construção de uma matriz de sensibilidades é executada através da média dos desvios de quatro pontos de funcionamento, como proposto em [Calisto, 2001] e chamada de Matriz Efetividade.

A seguir é apresentado o método de construção da matriz para o caso dos transformadores LTC:

- coloca-se o tap na posição nominal (1,0 pu) e armazena-se o resultado dos valores de tensão do fluxo de potência (V_{1,0});
- sobe-se o tap uma posição (1,0 pu + 0,00625 pu), roda-se o fluxo de potência e novamente armazena-se os valores de tensão (V_{1.0+0.00625});
- baixa-se o tap uma posição (1,0 pu 0,00625 pu), roda-se o fluxo de potência e armazena-se os resultados (V_{1,0-0,00625});
- sobe-se o tap duas posições (1,0 pu + 0.0125 pu), roda-se o fluxo de potência e armazenam-se os resultados (V_{1,0+0.0125});
- baixa-se o tap duas posições (1,0 pu 0.0125 pu), executa-se o fluxo de potência e armazenam-se os resultados (V_{1,0-0,0125});
- calcula-se o desvio ($\Delta + 0,00625$), para cada nó, sabendo que ($\Delta + 0,00625$) = $\frac{[V_{(1.0+0.00625)} - V_{(1.0)}]}{0,00625}$;

- calcula-se o desvio ($\Delta 0,00625$), para cada nó, sabendo que ($\Delta - 0,00625$) = $\frac{|V_{(1,0)} - V_{(1,0+0,00625)}|}{0,00625}$;
- calcula-se o desvio $(\Delta + 0.0125)$, para cada nó, sabendo que $(\Delta + 0.0125) = \frac{[V_{(1.0)} - V_{(1.0+0.0125)}]}{0.0125};$
- calcula-se o desvio ($\Delta 0.0125$), para cada nó, sabendo que $(\Delta 0.0125) = \frac{\left[V_{(1.0)} V_{(1.0+0.0125)}\right]}{0.0125};$
- faz-se a média dos desvios, sendo $média = \frac{(\Delta + 0,00625) + (\Delta - 0,00625) + (\Delta + 0,0125) + (\Delta - 0,0125)}{4}.$

Faz-se este procedimento para todos os dispositivos de controle que existirem no SD. As linhas da matriz efetividade gerada serão representadas pelos nós e as colunas pelos equipamentos de controle. Os valores da matriz são normalizados em um intervalo de [-1,1], pois a matriz efetividade é uma das variáveis de entrada do controlador de tensão *fuzzy*. A Figura 4-2, mostra o fluxograma para esta etapa.

Cada linha da matriz construída representa o impacto que cada equipamento de controle tem em determinado nó.

Depois de concluída os valores da matriz efetividade são normalizados nó a nó, da seguinte forma:

- encontra-se o ponto intermediário dos valores $Valor_{médio} = \frac{Valor_{máx} + Valor_{mín}}{2}$ para cada nó;
- o denominador será $Den = Valor_{máx} Valor_{médio}$;
- o valor normalizado é $Valor_{norm} = \frac{Valor Valor_{médio}}{Den}$.



1

FIGURA 4-2 - FLUXOGRAMA PARA A CONSTRUÇÃO DA MATRIZ EFETIVIDADE.

4.2. Controladores fuzzy

Para o projeto destes controladores é necessário ter como variáveis de entradas:

- a Matriz Efetividade;
- o status dos bancos de capacitores e qual potência está associada a este status;
- a posição do tap dos transformadores e/ou reguladores de tensão;

• A violação de tensão.

O objetivo é definir qual ação de controle deve ser tomada, quando existir um problema de sub ou sobretensão. Para isto, é definida uma banda morta $V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max}$, na qual devem ser colocadas todas as tensões do SD. Se em algum nó houver violação de tensão, o algoritmo identifica a pior violação e através da matriz efetividade identifica o dispositivo de controle que tem mais efetividade de controle sobre o nó com violação de tensão. Para alcançar este objetivo foram necessários construir dois controladores como mostra a Figura 4-3 [Miranda *et. Alli*, 2002; Miranda *et. Alli*, 2007]. As entradas normalizadas do controlador C1 são eficiência e posição e resultam em um sinal de poder de controle que junto com a variável violação de tensão, igualmente normalizada, constituem as variáveis de entrada do controlador C2 e que tem como sinal de saída a ação de controle. Este conjunto de controladores representa uma cascata de controladores de Mamdani e é necessário apenas um conjunto por alimentador, formando assim o controle central.



FIGURA 4-3 - CONJUNTO DE CONTROLADORES DE TENSÃO.

Depois de ocorrida a ação de controle, é executado o fluxo de potência para verificar se ainda existe algum nó com nível de tensão fora da faixa previamente escolhida. Caso ainda existam tensões a serem corrigidas, o algoritmo trabalha até corrigir todas as tensões, utilizando todos equipamentos de controle disponíveis na ordem da maior para a menor efetividade. Se depois de esgotados os equipamentos de controle, ou se o programa atingir alguma restrição imposta pelo usuário que não permita que os controladores atuem para determinado nó e as tensões não foram corrigidas, então o programa avisa que não há mais "controle" para o nó em questão e passa para a próxima violação, caso houver.

A Figura 4-4 apresenta o fluxograma desta etapa.



FIGURA 4-4 - FLUXOGRAMA DA ETAPA 2, EXECUÇÃO DA CASCATA DE CONTROLADORES DE MAMDANI.

Nesta etapa do programa o mapa de regras dos controladores tem extrema importância. Neste trabalho, foram implementados os mapas de regras apresentados em [Miranda *et. Alli*, 2007].

O mapa de regras é apresentado nas Figura 4-5 e Figura 4-6 e através dele é que o espaço de entrada é interpretado e calculado para um espaço de saída gerando os sinais de poder de controle e sinal de controle da Figura 4-3.

	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PB	PB	PS	ZE
NS	PB	PB	PS	ZE	NS
ZE	PB	PS	ZE	NS	NB.
PS	PS	ZE	NS	NB	NB
PB	ZE	NS	NB	NB	NB

FIGURA 4-5 – MAPA DE REGRAS DO CONTROLADOR C1 [MIRANDA ET. ALLI, 2007].

As cinco siglas representam as cinco funções de pertinência e significam: número negativo grande (NB), negativo pequeno (NS), zero (ZE), positivo pequeno (PS) e positivo grande (PB).

	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PB	ZE	NB	NB
NS	PS	PS	ZE	NS	NS
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE.
PS	NS	NS	ZE	PS	PS
PB	NB	NB	ZE	PB	PB

FIGURA 4-6 – MAPA DE REGRAS DO CONTROLADOR C2 [MIRANDA ET. ALLI, 2007].

No mapa do controlador C1 as linhas representam a entrada eficiência e as colunas o status. Em seguida no mapa do controlador C2 as linhas representam as violações de tensão e as colunas o poder de controle, que é o sinal de saída do controlador C1.

A Figura 4-7 foi gerada pelo Fuzzy Logic Toolbox do Matlab e representa as funções de pertinência das variáveis de entrada do controlador C1.



FIGURA 4-7 – MAPA DE REGRAS GERADO PELO FUZZY LOGIC TOOLBOX DO MATLAB.

São cinco funções de pertinência, para duas variáveis de entrada, o que gera 25 regras a serem interpretadas conforme o valor da variável de entrada. Neste exemplo, a entrada de eficiência é um número grande negativo e a entrada de posição também. Como resultado do mapa de regras do controlador C1, deve-se obter um número grande positivo para o sinal poder de controle. Isto realmente acontece e está apresentado na Figura 4-7 na coluna da variável "Control_signal". Essas entradas e saídas estão normalizadas dentro do intervalo [-1,1].

4.3. Ação de controle

O sinal de saída do controlador C2 é a ação de controle, porém este sinal deve ser desnormalizado para a base do equipamento em que será inferida tal ação de controle. Executase novamente o fluxo de potência para verificar se a tensão violada foi corrigida. Se a tensão foi corrigida, o algoritmo passa para o próximo nó que possuí violação de tensão, se houver. Caso não tenha sido corrigido o nível de tensão, o algoritmo determina se há ainda mudanças a serem feitas no controlador mais efetivo para aquele nó ou se será necessário atuar em outro dispositivo de controle. A Figura 4-8 mostra o fluxograma desta etapa.



FIGURA 4-8 - FLUXOGRAMA DA ETAPA DE AÇÃO DE CONTROLE.

O algoritmo será executado para a curva de carga de 24 horas, coordenando de forma online os equipamentos de controle de acordo com o carregamento do sistema. O algoritmo está aberto para inclusão de restrições que variam com a característica da rede de distribuição. O operador pode, por exemplo, em determinado horário, definir que é mais importante manter um nível de controle em relação aos limites dos taps de um regulador de tensão para que seja utilizado em uma certa emergência, deixando que certas violações de tensão no sistema ocorram. Ou ainda, caso seja conveniente, deixar que os equipamentos de controle atinjam seus limites, tratando-se de uma rede que não tenha grande variação de carga.

4.4. Fluxo de potência

Uma ferramenta fundamental para a aplicação proposta neste estudo é o *fluxo de potência*. Através do fluxo de potência são obtidas as informações necessárias para os controladores executarem suas funções. Nesta seção será revisado o conceito do fluxo de potência para sistemas de distribuição e apresentado o método implementado.

De acordo com [Srinivas, 2000], os métodos eficientes para a solução do fluxo de potência em sistemas de distribuição radiais são divididos em duas categorias:

- métodos de varredura direta e inversa;
- métodos baseados na matriz impedância nodal implícita.

Os métodos de varredura direta e inversa são recomendados, principalmente, para sistemas radiais, mas podem ser adaptados para sistemas fracamente malhados. Para sistemas malhados são utilizados os métodos baseados na matriz impedância nodal implícita [Chen, 1991], pois sua formulação é mais adequada para este fim. O método implementado, foi o Soma de Potências, que faz parte da primeira categoria.

Métodos como Newton-Raphson e Desacoplado Rápido [Monticelli, 1983], comumente utilizados em sistemas de transmissão, não apresentam bom desempenho no caso de sistemas de distribuição, tendo em vista as características deste tipo de sistema, tais como a baixa relação *X/R* dos parâmetros dos alimentadores, trechos com representação de chaves, reguladores de tensão e trechos com cargas muito próximas (baixa impedância), ligados a outros com impedância relativamente alta.

O método de Soma de Potências apresenta bons resultados no sentido da precisão das soluções, tempo de cálculo, etc. O processo iterativo do método é efetuado através das seguintes etapas:

- cálculo das potências equivalentes em cada nó, no sentido dos nós terminais para o nó fonte;
- cálculo das tensões nodais em cada nó, no sentido do nó fonte para os nós terminais;
- verificação da convergência através dos desvios de tensão;
- se não houver convergência, calculam-se as perdas nos ramos, no sentido dos nós terminais para o nó fonte e retorna-se a primeira etapa do processo iterativo, contabilizando as perdas na potência equivalente em cada nó.

O cálculo das potências equivalentes em cada nó k é realizado através das equações:

$$P_k^{eq} = P_k + \sum P_j + \sum \Pr_{kj}$$
 4-1

$$Q_k^{eq} = Q_k + \sum Q_j + \sum Qramos_{kj} + Q_k^{sh}$$

$$4-2$$

onde:

 P_k^{eq} - potência ativa equivalente no nó k;

 P_k - potência ativa no nó k;

 $\sum P_i$ - somatório das potências equivalentes dos nós *j*, conectadas após o nó *k*;

 $\sum P_i$ - somatório das perdas ativas nos ramos conectados entre o nó k e o nó j.

 Q_k^{sh} - potência reativa *shunt* injetada no nó *k*.

Os demais termos da equação de potência reativa são análogos aos da equação de potência ativa.

Dada a Figura 4-9, o cálculo das tensões nodais em cada nó k é realizado considerando:



FIGURA 4-9 – MODELO PARA EXPLANAÇÃO DOS CÁLCULOS DAS TENSÕES NODAIS.

$$S_{j}^{eq} = P_{j}^{eq} + jQ_{j}^{eq} = -V_{j}I_{jk}^{*}$$

$$I_{kj} = y_{kj}(V_{k} - V_{j})$$

$$S_{j}^{eq} = -V_{j}[y_{kj}(V_{j} - V_{k})]^{*}$$
4-3

Separando as partes reais das imaginárias, isolando os termos em *seno* e *co-seno* e aplicando a relação trigonométrica $sen^2 + cos^2 = 1$, chega-se à seguinte equação biquadrática:

$$A|V_{j}|^{4} + B|V_{j}|^{2} + C = 0$$

$$A = g_{kj}^{2} + b_{kj}^{2}$$

$$B = 2(P_{j}^{eq}g_{kj} - Q_{j}^{eq}b_{kj}) - y_{kj}^{2}|V_{k}|^{2}$$

$$C = (P_{j}^{eq})^{2} + (Q_{j}^{eq})^{2}$$

$$4-4$$

Da solução da equação biquadrática obtém-se o módulo da tensão no nó *j*. O ângulo é obtido conforme segue:

$$\theta_{j} = \theta_{k} + \phi_{kj} + \arctan\left(\frac{Q_{j}^{eq} - b_{kj} |V_{j}|^{2}}{P_{j}^{eq} + g_{kj} |V_{j}|^{2}}\right)$$

$$4-5$$

onde

$$y_{kj} = g_{kj} + jb_{kj} = |y_{kj}| \angle \phi_{kj}$$

$$V_j = |V_j| \angle \theta_j ; V_k = |V_k| \angle \theta_k$$
4-6

O cálculo das perdas nos ramos entre os nós j e k é realizado através das equações:

$$\mathbf{Pr}_{kj} = \left| I_{kj} \right|^2 r_{kj} = \left(\frac{S_j^{eq}}{V_j} \right)^2 r_{kj}$$

$$4-7$$

$$Qr_{kj} = |I_{kj}|^2 x_{kj} = \left(\frac{S_j^{eq}}{V_j}\right)^2 x_{kj}$$
4-8

4.4.1. Modelos dos equipamentos do sistema de distribuição

Esta subseção apresenta as equações que regem o comportamento dos componentes do sistema de distribuição.

Trechos de Alimentadores

As linhas e trechos de alimentadores são representados pelo modelo π , conforme Figura 4-10:



FIGURA 4-10 – MODELO π de um trecho de alimentador.

As equações de corrente são:

$$I_{kj} = y_{kj} (V_k - V_j) + j b_{sh} V_k$$

$$I_{jk} = y_{jk} (V_j - V_k) + j b_{sh} V_j$$
4-9

Para a obtenção das perdas de potência nos ramos, os fluxos de potência são calculados em ambos os sentidos.

Transformadores com relação 1:a

Os transformadores também são representados por um modelo π , como mostra a Figura 4-11. Para a obtenção das perdas, assim como no caso dos trechos de alimentadores, os fluxos de potência são calculados em ambos os sentidos.



FIGURA 4-11 – MODELO π do transformador com relação 1:a.

Capacitores Shunt

Os capacitores são representados através da susceptância ligada ao nó k. A Figura 4-12, mostra esta situação.


A potência reativa injetada no nó *k*, pelo capacitor é dada pela equação 4-10:

$$Q_k^{sh} = b_k^{sh} \left| V_k \right|^2 \tag{4-10}$$

Dessa forma, nos cálculos das tensões nodais, deve-se incluir novos termos nos coeficientes A, B e C da equação biquadrática, tal que resultam as seguintes expressões:

$$A|V_{j}|^{4} + B|V_{j}|^{2} + C = 0$$
4-11

$$A = g_{kj}^{2} + (b_{kj} + b_{sh})^{2}$$
4-12

$$B = 2 \left[P_j^{eq} g_{kj} - Q_j^{eq} (b_{kj} + b_{sh}) \right] - y_{kj}^2 |V_k|^2$$

$$= (-\pi)^2 (-\pi)$$

$$C = (P_j^{eq})^2 + (Q_j^{eq})^2$$
(4-13)

$$\theta_{j} = \theta_{k} + \phi_{kj} + \arctan\left(\frac{Q_{j}^{eq} - (b_{kj} + b_{sh})|V_{j}|^{2}}{P_{j}^{eq} + g_{kj}|V_{j}|^{2}}\right)$$

$$4-14$$

$$4-15$$

Cargas

As cargas são representadas por potência constante, mas podem ser também representadas pelo modelo ZIP, como mostra a equação:

$$P_{k} = (a_{p} + b_{p}V_{k} + c_{p}V_{k}^{2})P_{k}^{nom}$$
4-16

$$Q_{k} = (a_{q} + b_{q}V_{k} + c_{q}V_{k}^{2})Q_{k}^{nom}$$
4-17

onde,

 a_p , a_q - parcela da carga ativa e reativa modelada como potência constante; b_p , b_q - parcela da carga ativa e reativa modelada como corrente constante; c_p , c_q - parcela da carga ativa e reativa modelada como impedância constante.

sendo que:

$$a_p + b_p + c_p = 1 \tag{4-18}$$

$$a_q + b_q + c_q = 1 \tag{4-19}$$

Regulador de tensão

O regulador de tensão é um autotransformador que tem o objetivo de manter a tensão de saída em um valor especificado. A ação do regulador de tensão é representado pela equação 4-20. O valor do tap é incrementado do desvio calculado entre a tensão da iteração *i* e a tensão especificada.

$$tap_{ki} = tap_{ki-1} + \left(V_{ki} - V_{espec}\right)$$

$$4-20$$

onde, k é o nó controlado.

Regulador do tipo LDC (Line Drop Compensator)

Este tipo de regulador permite controlar a tensão em pontos remotos do alimentador. Ajustam-se valores percentuais de resistência e reatância calculados com base no valor de impedância, da distância entre o ponto onde está o regulador e o ponto da tensão controlada.

A tensão de saída desse tipo de regulador de tensão é calculada através da equação:

$$V_{out} = V_{espec} + I_L \cdot \left| R_{espec} \cos \theta + X_{espec} \sin \theta \right|$$
4-21

onde

 I_L - é a corrente que passa pelo regulador LDC;

 θ - é o ângulo do fasor tensão;

 $R_{reg} e X_{reg}$ - são os parâmetros de ajuste do regulador LDC;

Geração Distribuída

A inclusão de Geração Distribuída nos sistemas de distribuição é uma realidade e não poderia deixar de ser modelada. A literatura aborda o modelo de GD em fluxos de potência de duas formas: a primeira como um nó do tipo *PV*, ou seja, um nó em que os valores de potência ativa e tensão são conhecidos e é necessário calcular o valor da injeção de potência reativa para manter a tensão especificada; a segunda forma é através do cálculo de injeção de corrente no nó em que a GD está conectada, tratando a GD como uma injeção negativa que compensa a carga no nó, isto é, a carga líquida é igual a demanda menos a injeção de potência gerada. Neste fluxo de potência a GD foi modelada como um nó *PV* para manter a tensão de referência especificada pelo usuário. A Figura 4-13 mostra o modelo.



FIGURA 4-13 – MODELO DA GD.

onde: P_k e V_k são especificados e Q_k e I_k calculados.

A GD também foi tratada como nó do tipo PQ, mas com Q incrementado e não calculado, numa tentativa de implementá-la como equipamento de controle. Desta forma, ao invés do algoritmo calcular Q_k , este é fornecido pelo controle central *fuzzy*. Simulações e análise são apresentadas no Capítulo 5.

5. Simulação e Análise

Este capítulo apresenta as simulações de casos exemplos e real de sistemas de distribuição, utilizando como dispositivos de controle o transformador LTC da subestação, banco de capacitores da subestação, regulador de tensão do alimentador e bancos de capacitores alocados ao longo do alimentador. Também foram simulados os efeitos de fechamento de anéis e entrada de geração distribuída.

Durante as simulações, pelo fato dos equipamentos de controle perderem sua referência direta, o fluxo de potência é executado com a posição e status dos dispositivos de controle fixos. Isto ocorre após as ações de controle locais já terem sido efetuadas, mas sem sucesso de correção do problema. Então, quem passa a fornecer um sinal de mudança nos dispositivos de controle é o conjunto de controladores *fuzzy*. Desta forma os equipamentos são utilizados como dispositivo de controlado.

As próximas simulações utilizaram uma curva de carga exemplo de 24 horas, conforme mostra a Figura 5-1.



FIGURA 5-1 – CURVA DE CARGA NA SUBESTAÇÃO.

O primeiro sistema, mostrado na Figura 5-2, possui 32 nós e as características dos dispositivos de controle são apresentadas na Tabela 5-1. Esse sistema é radial, possui dois alimentadores assimétricos e não possuí Geração Distribuída. O sistema foi sobrecarregado para permitir analisar o comportamento dos controladores *fuzzy*.



FIGURA 5-2 - SISTEMA EXEMPLO DE 32 NÓS.

A Tabela 5-1 mostra a localização dos equipamentos de controle, bem como suas características.

Dispositivos de controle	Localização dos equipamentos	Nó de controle	Faixa de posições / Unidades		
Transformador ULTC	Entre os nós 01 e 02	02	16 posições		
Regulador de Tensão	Entre os nós 24 e 25	25	16 posições		
Banco de Capacitores	Nos nós 02, 10 e 13	02, 10 e 13	3 unidades de 600kvar cada		

TABELA 5-1 - CARACTERÍSTICAS DOS DISPOSITIVOS DE CONTROLE DO SISTEMA EXEMPLO.

5.1. Análise do método para um sistema radial

Este é um caso exemplo que tem por objetivos avaliar a atuação dos controladores *fuzzy* de tensão, o efeito após a execução da ação de controle e o alcance do principal objetivo, que é a equalização das tensões dentro de uma faixa pré-estabelecida.

A Figura 5-3 mostra que às 6h os nós 09, 11, 13, 15, 17 até o nó 32 possuem níveis de tensão abaixo do limite inferior estipulado (0,95 pu).



FIGURA 5-3 – TENSÕES DOS NÓS, ÀS 06H.

Após o algoritmo identificar as violações, foram executadas as ações de controle de acordo com a metodologia dos controladores *fuzzy* descrita no capítulo 4. É visível que as tensões, após as ações de controle, foram corrigidas e retornaram para a faixa pré-estabelecida de 0,95 pu a 1,05 pu.

A Tabela 5-2 mostra o comportamento dos equipamentos de controle antes e após estes equipamentos serem submetidos às ações de controle. A Tabela 5-2 foi obtida a partir de uma simulação de 24 horas que tem como parâmetros de carregamento a Figura 5-1.

Neste sistema o controle mais efetivo é o transformador da subestação. Pode-se observar isto avaliando a matriz efetividade, as violações de tensão e as ações para corrigi-las. Durante a simulação ocorrem violações de tensão às 6h, como mostra a Figura 5-3, e apenas com a mudança no tap do transformador da subestação é possível corrigir todas as tensões do sistema que estavam fora da faixa permitida, situação essa, também apresentada na Figura 5-3 e na Tabela 5-2.

Comportamento dos dispositivos de controle TAP Barra 2 em pu Banco de cap. 10 em kvar | Banco de cap. 13 em kvar TAP Barra 25 em pu Banco de cap. 2 em kvar Horas Antes Depois Antes Depois Antes Depois Antes Depois Antes Depois 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0306 1.0000 1.0000 1.0000 1.0306 1.0000 1.0000 1.0306 1.0306 1.0000 1.0306 1.0500 1.0000 1.0000 0.1163 1.0144 1.0500 1.0000 11 1.0500 0.1163 1.0144 1.0500 0.1163 1.0144 1.0500 0.1163 1.0144 1.0500 0.1163 1.0144 1.0500 0.1800 16 1.0500 0.1163 1.0144 1.0144 1.0500 0 1800 1 0144 1.0500 0.1800 0.1800 0.1800 1.0381 1.0500 0.1800 1.0144 18 0.1800 0.1800 1.0500 1.0500 0.1800 0.1800 0.1800 1.0381 1.0381 20 1.0500 0.1800 0.1800 0.1800 1.0381 2 1.0500 0.1800 0.1800 0.1800 1.0381 1.0500 1.0188 0.1800 0.1800 0.1800 0.1800 0.1800 0.1800 1.0381 1.0381 1 0 1 8 8 0.9880 0 1800 0 1800 0 1800 0 1 80 0 0 1800 0 1800 1 0381 1 0381

TABELA 5-2 – TABELA DO COMPORTAMENTO DOS DISPOSITIVOS, UNIDADES EM PU.

Uma situação interessante é o caso que ocorre entre às 18h, onde o sistema foi submetido a um incremento grande de carga, e 22h, horário que foi retirada a carga de forma abrupta. Às 18h os equipamentos se encontravam limitados para resolver as subtensões que estavam ocorrendo desde as 16h, apenas o regulador de tensão do nó 25 tinha faixa de regulação disponível para mudanças de tap e foi utilizado para corrigir as tensões dos nós onde o equipamento tem controle efetivo, como mostra a Figura 5-4.



FIGURA 5-4 – PERFIL DE TENSÃO DOS NÓS 25 A 32, ÀS 18H.

Como conseqüência, às 19h, apenas os nós 22, 23 e 24 estavam com seus valores de tensão violados, como mostra a Figura 5-5. Às 19h não houve ação de controle, pois os equipamentos estavam limitados. O algoritmo alertou que não havia dispositivo de controle efetivo para a solução deste problema. Passou então, para às 20h, e neste momento houve uma diminuição de carga e as tensões permaneceram dentro da banda morta. Às 22h, mais cargas foram desconectadas do sistema e como conseqüência ocorreram sobretensões, pois os dispositivos de controle estavam configurados para o perfil de subtensão. Os controladores *fuzzy* corrigiram o problema de sobretensão conforme a Figura 5-6, ajustando o nível de tensão para o valor pré-estabelecido.



FIGURA 5-5 – SISTEMA SEM MARGEM DE CONTROLE, ÀS 19H.



FIGURA 5-6 – TENSÕES DOS NÓS, ÀS 22H.

Esta simulação foi muito interessante, pois envolveu duas situações (subtensão e sobretensão) em que a metodologia do sistema de controladores *fuzzy* foi testada. A partir da Tabela 5-2 e das Figura 5-3 a 5-6 é possível verificar que os controladores executaram as ações de controle de forma adequada.

Outra análise interessante é a do fluxo de reativo no sistema. A Figura 5-7 mostra o fluxo de potência reativa nos trechos do sistema às 11h.



FIGURA 5-7 – FLUXO DE POTÊNCIA REATIVA, ÀS 11H.

E a Figura 5-8 apresenta o perfil de tensão para o mesmo horário. Nota-se que o perfil de tensão foi corrigido e que houve diminuição do fluxo de potência reativa por causa da entrada de banco de capacitores do nó 13, conforme Tabela 5-2.



FIGURA 5-8 – PERFIL DE TENSÃO, ÀS 11H.

De fato as tensões violadas foram corrigidas, não somente pela entrada do banco de capacitores, mas também pela alteração da posição do tap do regulador de tensão do nó 25, como mostra a Tabela 5-2.

A próxima seção apresenta resultados e análises dos efeitos do fechamento de malha no SD.

5.2. Caso com sistema em anel

Nesta simulação foi considerado o sistema da Figura 5-9, com o mesmo carregamento da Figura 5-1. Esta simulação tem o intuito de analisar o comportamento do sistema de controladores *fuzzy* em uma rede de distribuição com fechamento de anéis.

Neste SD foi acrescentada uma linha para conectar o nó 16, do segundo alimentador, ao nó 17, do primeiro alimentador, fechando uma malha no sistema.

Observou-se, então, que os equipamentos de controle têm maior influência em outros alimentadores da rede, que não o próprio, devido mudança topológica causada pelo fechamento do anel, o qual permite uma redistribuição dos fluxos de potência ativa e reativa entre os alimentadores.



FIGURA 5-9 – SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM ANEL.

Através da Figura 5-10 e da Tabela 5-3, pode-se verificar que com o sistema em malha fechada a utilização do banco de capacitores do nó 10 para as correções de tensão foi mais eficiente, não sendo necessário ligar as três unidades do banco de capacitores da subestação.

Esta simulação mostra que os controladores conseguem corrigir as tensões para a banda morta pré-estabelecida de 0,95 pu a 1,05 pu de maneira mais eficaz.



FIGURA 5-10 – SISTEMA EM ANEL, TENSÕES DOS NÓS ÀS 06H.

Observa-se que em malha fechada os dispositivos têm maior efetividade de controle sobre os nós de um outro alimentador. Por este motivo, a potência reativa injetada pelos bancos de capacitores tem uma melhor distribuição e o perfil de tensão do sistema torna-se mais equilibrado. Este fato faz com que o problema de sobretensão que, no caso do sistema radial ocorreu às 22h, ocorra nesta simulação as 23h. Os controladores *fuzzy* tiveram um comportamento adequado e realizaram a tarefa de acordo com a lógica programada.

A Tabela 5-3 mostra as ações de controle efetuadas pelos equipamentos do sistema de distribuição numa simulação de 24 horas.

Comportamento dos dispositivos de controle											
	TAP Bar	ra 2 em pu	Banco d	e cap. 2 em kvar	Banco de c	cap. 10 em kvar	Banco de ca	n. 13 em kvar	TAP Barra	25 em pu	
Horas	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Antes Depois		Depois	Antes	Depois	
0	1 0 0 0 0								1 0000		
1	1.0000	· · · · ·	((1	1.0000	;	
2	1.0000		((1.0000		
3	1.0000			1		1		1	1.0000		
4	1.0000	,	(1	· · · · ·	1			1.0000	· · · · · ·	
5	1.0000	,				1			1.0000		
6	1.0000	1.0159				1			1.0000	1.0000	
7	1.0159			1		1			1.0000		
8	1.0159								1.0000		
9	1.0159	,		l l					1.0000		
10	1.0159	1.0440							1.0000	1.0000	
11	1.0440	1.0500							1.0000	1.0095	
12	1.0500								1.0095		
13	1.0500								1.0095		
14	1.0500								1.0095		
15	1.0500								1.0095		
16	1.0500	1.0500						0.0900	1.0095	1.0095	
17	1.0500						0.0900		1.0095		
18	1.0500	1.0500		0.0900		0.1800	0.0900	0.1800	1.0095	1.0223	
19	1.0500		0.0900	I	0.1800	1	0.1800		1.0223		
20	1.0500		0.0900		0.1800		0.1800		1.0223		
21	1.0500		0.0900	<u> </u>	0.1800		0.1800		1.0223		
22	1.0500		0.0900	l'	0.1800	1	0.1800		1.0223		
23	1.0500	0.9880	0.0900	0.0900	0.1800	0.1800	0.1800	0.1800	1.0223	1.0223	

TABELA 5-3 - TABELA DO COMPORTAMENTO DOS DISPOSITVOS, UNIDADES EM PU.

A Figura 5-11 mostra o perfil de tensão das 23h. Neste horário ocorrem sobretensões causadas pelo ajuste dos equipamentos de controle para corrigir as subtensões que ocorrem a partir das 19 horas combinada com a redução de carga.



FIGURA 5-11 – TENSÕES DOS NÓS, ÀS 23H.

Esta simulação do sistema exemplo foi importante porque através dela foi possível observar o comportamento da matriz efetividade que demonstrou a influência do banco de capacitores do segundo alimentador nos nós do primeiro. Também foi possível validar a metodologia para este caso.

A próxima seção apresenta as análises efetuadas para as simulações em um sistema real.

5.3. Sistema Roçado, alimentador 06

O sistema de distribuição RCO-06 é um alimentador radial real equivalentado em 47 nós. A Tabela 5-4 mostra a disposição dos equipamentos de controle. O diagrama do sistema é mostrado na Figura 5-12. Serão apresentadas duas situações:

- sistema RCO-06, sem inclusão de Geração Distribuída;
- sistema RCO-06, com inclusão de Geração Distribuída.

Com estas simulações pode-se avaliar o comportamento dos controladores *fuzzy* de tensão com e sem a presença de GD e também a influência da GD no sistema RCO-06.

Dispositivos de controle	Localização dos equipamentos	Nó de controle	Faixa de posições / Unidades
Regulador de tensão	Entre os nós 04 e 05	05	16 posições
Banco de capacitores	No nó 11	11	3 unidades de 300kvar cada
Regulador de tensão	Entre os nós 15 e 16	16	16 posições
Banco de capacitores	No nó 31	31	3 unidades de 600kvar
Regulador de tensão	Entre os nós 36 e 37	37	16 posições

TABELA 5-4 – ALOCAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE.



FIGURA 5-12 – SISTEMA ROÇADO 06.

5.3.1. Simulação do alimentador RCO-06 sem GD.

Esta simulação tem o objetivo de analisar o comportamento dos controladores *fuzzy* para um sistema mais complexo que o sistema exemplo apresentado na seção 5.1. A curva de carga do sistema é apresentada na Figura 5-13.



FIGURA 5-13 - CURVA DE CARGA SISTEMA RCO-06.

A simulação executada foi de 24 horas e serão apresentados os resultados mais representativos. A Figura 5-14 mostra as tensões às 06h, onde ocorrem as primeiras violações de tensão.



FIGURA 5-14 - TENSÕES DO SISTEMA RCO-06, ÀS 06H.

Observa-se que as ações de controle foram suficientes para corrigir todas as tensões. A Tabela 5-5 envolve a simulação das 24 horas e apresenta as ações de controle efetuadas.

Comportamento dos dispositivos de controle											
	TAP Barra 5 em pu B		Bancode	Banco de cap. 11 em kvar		TAP Barra 16 em pu		Banco de cap. 31 em kvar		TAP Barra 37 em pu	
Horas \ Barras	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	
0	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
1	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
2	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
3	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
4	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
5	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
6	1.0000	1.0274	0.0300	0.0300	1.0000	1.0000	0.0600	0.0600	1.0000	1.0000	
7	1.0274		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
8	1.0274		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
9	1.0274		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
10	1.0274	1.0392	0.0300	0.0300	1.0000	1.0000	0.0600	0.0600	1.0000	1.0000	
11	1.0392	1.0500	0.0300	0.0300	1.0000	1.0000	0.0600	0.0600	1.0000	1.0101	
12	1.0500		0.0300		1.0000		0.0600		1.0101		
13	1.0500		0.0300		1.0000		0.0600		1.0101		
14	1.0500		0.0300		1.0000		0.0600		1.0101		
15	1.0500		0.0300		1.0000		0.0600		1.0101		
16	1.0500	1.0500	0.0300	0.0300	1.0000	1.0000	0.0600	0.0600	1.0101	1.0200	
17	1.0500		0.0300		1.0000		0.0600		1.0200		
18	1.0500	1.0500	0.0300	0.1800	1.0000	1.0000	0.0600	0.1800	1.0200	1.0500	
19	1.0500	1.0500	0.1800	0.1800	1.0000	1.0000	0.1800	0.1800	1.0500	1.0500	
20	1.0500		0.1800		1.0000		0.1800		1.0500		
21	1.0500		0.1800		1.0000		0.1800		1.0500		
22	1.0500		0.1800		1.0000		0.1800		1.0500		
23	1.0500	1.0188	0.1800	0.1800	1.0000	1.0000	0.1800	0.1800	1.0500	1.0500	

TABELA 5-5 – Ações de controle efetuadas para o sistema RCO-06.

A partir da Tabela 5-5 nota-se que o regulador de tensão do nó 16 não atua durante toda a simulação. Porém o nó 26, conforme Figura 5-14, que através do cálculo da matriz efetividade, é um nó que faz parte da área de efetividade de controle deste equipamento, tem violação de tensão. Isto ocorre porque a violação de tensão do nó 26 não é a pior e através da atuação dos outros dispositivos de controle a violação do nó 26 também é corrigida. Logo o equipamento não precisa atuar, o mesmo ocorre em outros horários durante essa simulação.

Outro resultado importante é que às 18h, devido ao alto carregamento do sistema, as tensões violadas não são totalmente corrigidas, como mostra a Figura 5-15. Isto ocorre pelo fato de que as posições dos taps e os status dos bancos de capacitores, realmente efetivos para esses determinados nós, estavam em seus limites e não havia mais dispositivos de controle. O programa alertou e corrigiu somente aquelas violações que podia corrigir, como por exemplo o nó 24, conforme Figura 5-15, que não era a pior violação, mas era uma das violações que poderiam ser corrigidas através da entrada de banco de capacitores do nó 11.



FIGURA 5-15 – TENSÕES DO SISTEMA RCO-06, ÀS 18H.

Também foi analisada a sobretensão que ocorreu às 23h, pois os equipamentos estavam ajustados para o perfil de subtensão. O programa executou as devidas ações de controle e corrigiu o problema como é apresentado na Figura 5-16.



FIGURA 5-16 – TENSÕES DO SISTEMA RCO-06, ÀS 23H.

Através da simulação deste sistema pode-se verificar que mesmo quando os controladores *fuzzy* não conseguem corrigir as piores violações, é também verificado a possibilidade de corrigir outras violações. Em caso afirmativo são executadas as devidas ações de controle.

5.3.2. Simulação do alimentador RCO-06 com inclusão da GD.

A disposição dos equipamentos de controle é apresentada na Tabela 5-4. A simulação executada é para um período de 24 horas e a curva de carga é apresentada na Figura 5-13. Serão apresentados os principais resultados dessa simulação.

A GD foi inserida no nó 32 do SD RCO-06. Esta mudança refletiu no perfil de tensão do sistema, como mostra a Figura 5-17.



FIGURA 5-17 – PERFIL DE TENSÃO COM E SEM GD.

É evidente a mudança no perfil das tensões em função da conexão da GD no SD. Nessa simulação, por causa dessa mudança no perfil das tensões, as violações de tensão começaram a ocorrer às 10h, como mostra a Figura 5-18. Apesar da GD, nessa análise, não ser utilizada como

equipamento de controle, o nó onde está conectada é visto pelos controladores *fuzzy* de tensão como um nó a ser controlado. Portanto, pode-se observar que as tensões para às 10h foram corrigidas, atingindo o objetivo de ajustar os controladores para se ter um perfil de tensão entre 0,95 pu e 1,05 pu.



FIGURA 5-18 – TENSÕES DO SISTEMA RCO-06, ÀS 10H.

A Tabela 5-6 mostra as ações de controle realizadas durante toda a simulação. Pode-se notar que o regulador de tensão, localizado entre os nós 4 e 5, atuou primeiro às 10h. No horário das 18h é necessária a atuação dos bancos de capacitores e de outro regulador de tensão. Após este horário não há mais violações de tensão até o fim da simulação. Pode-se analisar que com a melhor coordenação de tensão do sistema, não houve sobretensões.

Comportamento dos dispositivos de controle											
	TAP Bar	ra 5 em pu	Bancode	e cap. 11 em kvar	TAP Barra 16 em pu		Banco de cap. 31 em kvar		TAP Barra 37 em pu		
Horas	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	
0	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
1	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
2	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
3	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
4	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
5	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
6	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
7	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
8	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
9	1.0000		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
10	1.0000	1.0124	0.0300	0.0300	1.0000	1.0000	0.0600	0.0600	1.0000	1.0000	
11	1.0124	1.0242	0.0300	0.0300	1.0000	1.0000	0.0600	0.0600	1.0000	1.0000	
12	1.0242		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
13	1.0242		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
14	1.0242		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
15	1.0242		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
16	1.0242	1.0344	0.0300	0.0300	1.0000	1.0000	0.0600	0.0600	1.0000	1.0000	
17	1.0344		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
18	1.0344	1.0500	0.0300	0.1016	1.0000	1.0000	0.0600	0.1800	1.0000	1.0256	
19	1.0500		0.1016		1.0000		0.1800		1.0256		
20	1.0500		0.1016		1.0000		0.1800		1.0256		
21	1.0500		0.1016		1.0000		0.1800		1.0256		
22	1.0500		0.1016		1.0000		0.1800		1.0256		
23	1.0500		0.1016		1.0000		0.1800		1.0256		

TABELA 5-6 – COMPORTAMENTO DOS DISPOSITIVOS DO SISTEMA RCO-06. Comportamento dos dispositivos de controle

5.3.3. Efeito do modelo de carga no sistema RCO-06

Esta simulação tem o objetivo de analisar o efeito do modelo de carga nas tensões dos nós do alimentador Roçado 06. O sistema é apresentado na Figura 5-12 e a disposição dos equipamentos de controle na Tabela 5-4. As cargas são representadas de acordo com as Equações 4-16 e 4-17.

As cargas foram modeladas, nesta simulação, com 60% da parcela de carga ativa, sendo potência constante e 40% sendo impedância constante, em todos os nós do alimentador. A Figura 5-19 mostra os resultados obtidos para a simulação da curva de carga apresentada na Figura 5-13. As parcelas da carga reativa são 100% potência constante.



FIGURA 5-19 - EFEITO DO MODELO DE CARGA NO ALIMENTADOR RCO-06 ÀS 06H.

Observa-se que o efeito da modelagem da carga influi consideravelmente nos resultados obtidos uma vez que a Figura 5-19 mostra que as tensões dos nós 26 e 28 do sistema, não violam os limites pré-estabelecidos. De outra forma, para a mesma simulação, mas com as cargas tendo a parcela da carga ativa modeladas como 100% potência constante e a parcela da carga reativa também como sendo 100% potência constante, houve violações de tensão nos nós 26 e 28 como mostra a Figura 5-19. É importante lembrar que a Figura 5-19 apresenta os valores de tensão para o horário das 06h.

A Figura 5-20 mostra uma comparação entre os perfis de tensão com a modelagem de carga da parcela de potência ativa com 60% P constante e 40% Z constante e com as parcelas de potência ativa modeladas com 100% P constante antes e depois das ações de controle.

Como conclusão sabe-se que não se pode esperar um bom resultado do controlador central *fuzzy* se a carga não estiver modelada de forma adequada.



FIGURA 5-20 – PERFIS DE TENSÃO COM DIFERENTES MODELOS DE CARGA.

A Tabela 5-7 mostra o comportamento dos dispositivos de controle para a simulação de 24 horas identificando as mudanças executadas pelas ações de controle.

Comportamento dos dispositivos de controle											
	TAP Barra 5 em pu		Banco de cap. 11 em kvar		TAP Ba	TAP Barra 16 em pu		Banco de cap. 31 em kvar		TAP Barra 37 em pu	
Horas	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	
0	1.0000	1.0152	0.0300	0.0300	1.0000	1.0000	0.0600	0.0600	1.0000	1.0000	
1	1.0152		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
2	1.0152		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
3	1.0152		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
4	1.0152		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
5	1.0152		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
6	1.0152	1.0402	0.0300	0.0300	1.0000	1.0000	0.0600	0.0600	1.0000	1.0000	
7	1.0402		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
8	1.0402		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
9	1.0402		0.0300		1.0000		0.0600		1.0000		
10	1.0402	1.0500	0.0300	0.0300	1.0000	1.0000	0.0600	0.0600	1.0000	1.0100	
11	1.0500	1.0500	0.0300	0.0300	1.0000	1.0000	0.0600	0.0600	1.0100	1.0215	
12	1.0500		0.0300		1.0000		0.0600		1.0215		
13	1.0500		0.0300		1.0000		0.0600		1.0215		
14	1.0500		0.0300		1.0000		0.0600		1.0215		
15	1.0500		0.0300		1.0000		0.0600		1.0215		
16	1.0500	1.0500	0.0300	0.0300	1.0000	1.0000	0.0600	0.1800	1.0215	1.0328	
17	1.0500		0.0300		1.0000		0.1800		1.0328		
18	1.0500	1.0500	0.0300	0.1800	1.0000	1.0000	0.1800	0.1800	1.0328	1.0500	
19	1.0500	1.0500	0.1800	0.1800	1.0000	1.0000	0.1800	0.1800	1.0500	1.0500	
20	1.0500	1.0500	0.1800	0.1800	1.0000	1.0000	0.1800	0.1800	1.0500	1.0500	
21	1.0500		0.1800		1.0000		0.1800		1.0500		
22	1.0500		0.1800		1.0000		0.1800		1.0500		
23	1.0500		0.1800		1.0000		0.1800		1.0500		

TABELA 5-7 – COMPORTAMENTO DOS DISPOSITIVOS PARA A SIMULAÇÃO DE MODELO DE CARGA.

A Figura 5-21 apresenta uma simulação no horário das 18h onde o perfil de carga é mais pesado. Esta simulação foi feita nas mesmas condições de modelagem, ou seja, a parcela de carga reativa foi modelada como 100% P constante e a parcela de carga ativa como 60% P constante e 40% Z constante.



FIGURA 5-21 – PERFIL DE TENSÃO COM DIFERENTES MODELOS DE CARGA ÀS 18H.

Neste caso o perfil de tensão dos nós 41 a 47 não foram corrigidos, pois os dispositivos de controle, conforme a Tabela 5-7, que têm efetividade de controle sobre esses nós, já estavam limitados. Esta simulação mostra não somente a importância da modelagem da carga para se obter bons resultados, mas também o processo das ações de controle onde o controlador *fuzzy* consegue corrigir algumas tensões, naqueles nós que há efetividade de controle. Também é apresentada a situação em que alguns dispositivos têm margem de controle, mas não possuem efetividade de controle sobre determinados nós, não corrigindo as tensões destes. Conforme a Tabela 5-7, o regulador de tensão do nó 16 tem margem para ação de controle, mas não tem efetividade de controle sobre os nós que não foram corrigidos.

5.4. GD como equipamento de controle

Usualmente a GD, no âmbito de controle, é utilizada para manter a tensão no nó em que está conectada. Isto significa que no fluxo de potência, o nó de conexão da GD pode ser tratado como um nó do tipo *PV* e, sua potência reativa é calculada para manter a tensão especificada.

No entanto, quando a GD for utilizada pelo controlador central *fuzzy*, perde-se a referência de tensão do nó de conexão, pois o controle central enviará um sinal para incremento ou decremento do dispositivo de controle, no caso a potência reativa. O que ocorre de fato é que o controle central, na metodologia proposta, observa o nó de pior violação de tensão e não calcula a tensão de referência do nó de conexão da GD, apenas envia sinais de incremento ou decremento do dispositivo até que a pior violação de tensão seja corrigida para a faixa prédeterminada.

Este é um problema significativo, pois se o modelo da GD no fluxo de potência for um nó *P* utilizando incrementos de potência reativa enviados pelo controlador central para que a tensão do nó de pior violação seja corrigida, este modelo, não será mais eficaz do que considerar uma tensão de referência para o nó de conexão da GD, ou seja, modelar o nó de conexão como *PV*. Isto significa que, utilizando os incrementos de potência reativa, teríamos a execução de vários fluxos de potência para que o problema fosse corrigido. Enquanto que a utilização de um valor de referência para o nó de conexão faz com que o cálculo da potência reativa a ser gerada para manter a referência deste mesmo nó seja calculada em apenas uma execução do fluxo de potência. Não se deve esquecer de levar em conta os limites de operação da GD, o que torna o problema ainda mais complexo.

A Figura 5-22, mostra o resultado do fluxo de potência em um sistema exemplo radial de 32 nós. Nesta simulação o nó de conexão da GD foi modelado como PV, $P \in PQ$. No caso do modelo como PQ, não há GD no sistema, apenas para exemplificação e comparação dos resultados.



FIGURA 5-22 – TENSÕES EM FUNÇÃO DO MODELO DA GD E TENSÃO SEM GD NO SISTEMA.

O gráfico mostra que para uma execução do fluxo de potência, com o nó de conexão da GD modelado com *PV*, a melhora do perfil de tensão do sistema é bastante significativa.

Por estes motivos a GD não foi utilizada como equipamento de controle do *controle volt/var*. Este é um tópico que deve ser melhor abordado e estudado.

6. Conclusões

O estudo apresentado propõe uma metodologia de *controle volt/var* para sistemas de distribuição baseado em lógica fuzzy que utiliza os equipamentos tradicionais da rede de média tensão, de forma coordenada e acoplada para solucionar o problema de controle de tensão/potência reativa. O objetivo das simulações apresentadas nesta dissertação foi comprovar que essa metodologia pode ser usada na operação de sistemas de distribuição e que auxilia efetivamente na tomada de decisão por parte dos operadores e despachantes dos Centros de Operação.

Não foi aprofundado o estudo de funções de pertinência adequadas para cada tipo de SD e também não foi estudada a possível inclusão de outros aspectos que poderiam pertencer ao espaço de entrada dos controladores *fuzzy*, como por exemplo, aspectos econômicos, limites de atuações, etc. Porém as análises efetuadas nesta dissertação comprovam a eficiência da metodologia proposta e a facilidade lingüística que é inerente ao método *fuzzy*. Esta é uma questão fundamental para uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão, onde o operador deve se sentir à vontade com a ação de controle proposta pelo programa.

Para testar e avaliar a efetividade da utilização do método em sistemas de distribuição foram implementados dois sistemas: um sistema teste de 32 nós e um sistema real reduzido de 47 nós. A aplicação do método em ambos mostrou-se adequada em termos da qualidade da resposta obtida e do desempenho computacional.

Apresenta-se a seguir uma síntese das principais conclusões obtidas em relação a metodologia desenvolvida e sobre os resultados da sua aplicação.

A metodologia desenvolvida tem por objetivo corrigir violações de tensão que estejam fora de uma faixa segura de operação. Dessa forma, não é objetivo final da metodologia determinar um ponto ótimo de tensão, mas assegurar que todas as tensões do sistema estejam dentro de uma faixa pré-determinada. Foi implementado, para tal, um sistema de controle, baseado em uma arquitetura centralizada de controladores em cascata do tipo Mamdani, que recebe informações de um espaço de entrada e através da lógica *fuzzy* fornece um espaço de saída que é interpretado e resulta em uma dada ação de controle. Os algoritmos foram implementados em Matlab, utilizando o Toolbox de *Fuzzy System*, pela facilidade de implementação e testes dos algoritmos, demonstrando um desempenho adequado para este tipo de sistema de simulação. Estes algoritmos foram integrados a um ambiente de simulação, onde foi implementado o cálculo de fluxo de carga baseado no método Somatório de Potências, que permite a inserção de geração distribuída e modelagem de carga dependente da tensão, além de suportar fechamento de malhas na rede.

Uma fase crítica da metodologia refere-se ao método que deve ser utilizado para determinar a matriz sensibilidade. Na presente dissertação utilizou-se a média dos desvios de tensão de quatro pontos de operação dos equipamentos de controle disponíveis na rede. Esta opção foi baseada em sugestões da literatura, que apontam que a Matriz Sensibilidade convencional, baseada em pequenos incrementos e linearização em torno de um ponto de operação, não é adequada quando estão envolvidos grande incrementos, como é o caso de chaveamentos dos bancos de capacitores. Embora este tipo de abordagem não seja sofisticado numericamente, seus resultados mostraram-se adequados para o propósito da metodologia.

Especial atenção deve ser dada à questão da normalização das entradas dos controladores, as quais devem ser compatíveis com as funções de pertinência. Como os sinais de entrada provêem de diferentes naturezas (tap dos transformadores e quantidade de potência reativa disponível nos bancos de capacitores), optou-se por normalizar as variavéis de entrada para um mesmo intervalo e para as mesmas funções de inferência. Isto faz com que a variável de saída do controlador também esteja no mesmo intervalo de normalização, facilitando a conversão da linguagem fuzzy (PB, PS, ZE, NS e NB) em uma resposta física adequada. A saída do processo de controle é uma ação que deve ser aplicada diretamente a um dispositivo de controle de tensão.

Em relação a aplicação da metodologia às redes de distribuição, as seguintes conclusões foram obtidas.

• Sistema Teste de 32 nós: neste sistema foram simuladas duas situações topológicas.

Operação Radial - Para esta topologia o algortimo funcionou satisfatoriamente. Neste sistema a maior efetividade para todos os nós é a do LTC e para os nós restantes a efetividade se alterna entre os equipamentos ao longo dos alimentadores. Da Tabela

5-2 obtém-se o número de atuações dos equipamentos de controle e o incremento ou decremento, efetuado em cada dispositivo de controle. Neste caso, às 19h não houve ação de controle devido a limitação dos equipamentos disponíveis, mostrando a coerência do método aplicado. Nas demais situações o método corrigiu todas àquelas violações de tensão, possíveis de correção, de forma coordenada de acordo com a matriz efetividade.

Operação em anel – Nesta simulação houve uma alteração nos valores da matriz sensibilidade, pois existe uma interação entre os equipamentos de ambos os alimentadores, isto é, efeitos da atuação de um determinado equipamento em um alimentador afeta a regulação de tensão do alimentador adjacente, e vice-versa. Neste caso, em função da operação em malha, com incrementos menores nos dispositivos é possível corrigir as violações de tensão, proporcionando uma maior segurança, a medida que existe uma maior reserva de reativos, por parte dos bancos de capacitores e uma maior margem para a mudança de tap dos reguladores de tensão e dos LTCs. Por este motivo não houve saturação de todos equipamentos de controle durante a simulação, para a mesma curva de carga da simulação para operação radial, como mostra a Tabela 5-3.

 Sistema RCO – Para este sistema foram realizados testes para operação de forma radial e na presença de geração distribuída, bem como foi utilizado o modelo de carga dependente da tensão para modelar a curva de carga de 24 horas.

RCO operando de forma Radial sem GD - Para este sistema um dos reguladores de tensão não é acionado durante todo o período de simulação. Isto significa que, para a curva de carga utilizada, os outros controladores foram suficientes para corrigir as tensões dos nós que, através da matriz efetividade, pertenceriam à área de atuação deste regulador de tensão. De fato, ocorreu que em nenhum momento os nós da área deste regulador apresentavam a pior violação de tensão do sistema, mas suas violações foram corrigidas de forma indireta pela atuação dos outros equipamentos. Isto demonstra que os controladores fuzzy efetuaram as ações de controle de acordo

com a metodologia proposta e mostra a vantagem de utilizar os equipamentos de forma coordenada e acoplada.

RCO operando de forma Radial com GD - A inclusão da GD na rede alterou o perfil de tensão, fazendo com que as piores violações de tensão não fossem mais as do fim do alimentador. O algoritmo também se mostrou adequado para este tipo de situação. Com a inclusão da GD diminuiu-se as ações de controle, assim como o incremento das mesmas. As simulações permitem também verificar que para esta topologia e para a curva de carga utilizada, há equipamentos de controle de tensão que ficam ociosos na rede, pois a ccordenação dos equipamentos é mais efetiva do que o controle individual.

RCO operando de forma Radial sem GD com carga dependente da tensão - Este caso foi simulado no intuíto de se estudar os efeitos de diferentes modelagens de carga no sistema e no comportamento dos controladores. Os resultados foram comparados aos resultados da simulação onde todos os nós utilizavam o valor de 100% nas parcelas de potência ativa e reativa constantes. O algoritmo obteve êxito também para este cenário, corrigindo as violações de tensão. Em determinado horário não houve correção da violação de tensão pois os equipamentos efetivos para estes nós se encontravam limitados. Observa-se que para o caso onde a modelagem de carga foi utilizada, houveram correções em horários diferentes dos anteriores, conseqüência da mudança do perfil de tensão. Esta situação mostra a importância de considerar-se a modelagem de carga em estudos de controle de tensão em alimentadores.

A partir das conclusões apresentadas acima é possível verificar que o método proposto é robusto quanto a mudança topológica da rede, ou seja, se mostrou eficaz tanto para redes de distribuição radiais quanto para as redes malhadas. Da mesma forma se mostrou eficaz quanto a entrada de GD no sistema e para diferentes modelagens de carga.

Todas as simulações foram realizadas para uma curva representando 24 pontos de demanda, descritos por uma curva de carga de 24 horas, onde procurou-se representar as variações da demanda típica durante um dia de operação. Nesta curva de carga foi representado níveis de carga leve, média e pesada. O algoritmo se comportou como o esperado, solucionando

àqueles casos que, através da disponibilidade dos equipamentos de controle, poderiam ser solucionados, ou seja, através das ações de controle corrigiu as violações de tensão para a faixa pré-estabelecida de 0,95 pu a 1,05 pu. O controle foi efetuado de forma coordenada e trabalhando com LTCs, bancos de capacitores das subestações e ao longo da rede e reguladores de tensão alocados ao longo da rede, de forma acoplada, ou seja, executou as operações de controle analisando os equipamentos de forma conjunta.

Houve uma melhora na distribuição do fluxo de potência reativa no sistema, resultado da melhora no perfil de tensão que se deve a coordenação da atuação dos dispositivos de controle de tensão/potência reativa e da entrada dos bancos de capacitores na rede.

Foram identificadas várias potencialidades e novas características para melhoria da pesquisa realizada, algumas das quais são apresentadas na próxima seção como sugestões de trabalhos futuros.

6.1. Trabalhos futuros

A partir destes resultados surgiram novos possíveis estudos que podem contribuir e/ou complementar este trabalho, dos quais destacam-se:

- desenvolvimento de novos métodos para cálculo da efetividade;
- estudo das funções de pertinência;
- inclusão de aspectos econômicos;
- inclusão de GD como equipamento de controle;
- determinação de opções de controle a serem efetuadas e qual o custo para cada uma delas;
- inserção de novas restrições de operação, tais como limitação do número de atuações dos equipamentos de controle.

Estes tópicos, constituem pesquisas em potencial identificadas durante a execução deste estudo que podem contribuir efetivamente com o presente trabalho. Juntos podem formar um esquema de *controle volt/var* bastante eficiente tornando-se uma ferramenta muito importante na operação de sistemas de distribuição de energia elétrica.

7. Referências Bibliográficas

- [Bremermann, 2002] BREMERMANN, L. E. et. Alli. "Análise e Simulação de um Modelo Discreto de Transformador com Mudança de Tap Sob Carga Utilizando Matlab/Simulink". XV CBA – Congresso Brasileiro de Automática. Natal, RN. Nov. 2002.
 - [Calovic, 1984] CALOVIC, M. S. "Modeling and Analysis of Under-Load Tap-Changing Transformer Control Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. PAS-103. Vol.7. pp. 1909-1915.
 - [Chen, 1991]
 CHEN, T-H et. Alli. "Distribution System Power Flow Analysis A Rigid Approach". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 3. Issue 3. pp. 1146-1152. Jul. 1991.
- [Dy Liacco, 1967] DY LIACCO, T. "The Adaptive reliability Control System". IEEE Transactions on Power and Apparatus and Systems. Vol. PAS-86. Issue 5. pp. 517-531. Maio 1967.
- [Dy Liacco, 1974] DY LIACCO, T. "*Real Time Computer Control of Power System*". *Proceedings of The IEEE*. Vol. 62. Issue 7. pp. 884-891. Jul. 1974.
- [Ekel et. Alli, 2001] EKEL, P.Y. et. Alli. "Fuzzy logic in voltage and reactive power control in regulated and deregulated environments". Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES. Vol. 1, pp. 85-90. Nov. 2001.
- [El-Hawary, 1998] El-HAWARY, M. E. "Electric Power Applications of Fuzzy Systems". IEEE Press, 1998.
 - [Evans, 2005] EVANS, P. "Optimal Portfolio Methodology for Assessing Distributed Energy Resources Benefits for the Energynet"

- [Fukuyama e Yoshida, 2001]
 FUKUYAMA, Y. e YOSHIDA, H. "A particle swarm optimization for reactive power and voltage control in electric power systems". Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation. Vol. 1, pp. 87-93. Maio 2001.
- [Fuzzy Logic Toolbox, Matlab Fuzzy Logic Toolbox. Mathworks, 1995. 1995]
 - [Gönen, 2008]GÖNEN, T. "Electric Power Distribution System Engineering".CRC Press. Second Edition. 2008.
- [Green e Wilson, 2007] GREEN, J. N. e WILSON, R. "Control and Automation on Electrical Power Distribution Systems". CRC, 2007.
 - [Gu e Rizy, 1996] GU, Z. e RIZY, D. T. "Neural Networks for Combined Control of Capacitor Banks and Voltage Regulators in Distribution Systems". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 11. Issue 4. pp. 1921-1928. Out. 1996.
 - [Harlow, 2004] HARLOW, J. H. "Electric Power Transforming Engineering". CRC Press. 2004.
 - [Hatziargyriou, 2005] HATZIARGYRIOU, N. "DER and Microgrids: Research Topics within EU Framework Programs". Presentation CERTS, Berkeley 2005 Symposyum on Microgrids. June, 2005.
 - [Hsu e Kuo, 1993]
 HSU, Y-Y. e KUO, H-C.: "Dispatch of Capacitors on distribution system using dynamic programming". IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution. Vol. 139. pp. 433-438. Nov. 1993.
 - [Hsu e Lu, 1998] HSU, Y-Y. e LU, F-C. "A Combined Artificial Neural Network-Fuzzy Dynamic Programming Approach to Reactive Power/Voltage Control in a Distribution Substation". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 13, No. 4, pp. 1265-1271. Nov. 1998.
 - [Hsu e Yang, 1994] HSU, Y-Y. e YANG, C-C. "A Hybrid Artificial Neural Network-

Dynamic Programming Approach for Feeder Capacitor Scheduling". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 9. Issue 2, pp. 1069-1075. Maio 1994.

- [Ilic e Lim, 1991] ILIC, M. e LIM, K. K. "Control Coordination on the distribution power network", Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Singapore, pp. 1232-1235. Jun. 1991.
- [Kundur, 1983] KUNDUR, P. "*Power System Stability and Control*". McGraw-Hill. First Edition. 1994.
- [Laframboise et. Alli, LAFRAMBOISE, G. et. Alli. "An Expert System For Reactive 1995]
 Power Control ff a Distribution System; Part 2: Implementation". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 10. Issue 3. pp. 1433-1441. Ago. 1995.
- [Liang e Wang, 2003] LIANG, R. H. e WANG, Y. S. "Fuzzy-Based Reactive Power and Voltage Control in a Distribution System". IEEE Transactions On Power Delivery. Vol. 18. Issue 2, pp. 610-618. Abr. 2003.
- [Loc-Le e Negnevitsky, LOC-LE, T. e NEGNEVITSKY, M. "Expert System Application for 1997] Voltage and VAR Control in Power Transmission and Distribution Systems". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 12, Issue. 3. Jul. 1997.
 - [Lu e Hsu, 1995] LU, F-C. e HSU, Y-Y.; "Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming". IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Volume 142, Issue 6, pp. 639 645. Nov. 1995.
- [Miranda e Calisto, 2002] MIRANDA, V. e CALISTO, P. "A Fuzzy Inference System to Voltage/var Control in DMS – Distribution Management System". 14th PSCC – Power System Computation Conference. Sevilla, Jun. 2002.
 - [Miranda e Fonseca,MIRANDA, V. e FONSECA, N. "EPSO-best-of-two-worlds meta-2002a]heuristic applied to power system problems". Congress onEvolutionary Computation, 2002. CEC '02. Proceedings of the

2002. Vol. 2, pp. 1080-1085. Honolulu, HI, USA.

- [Miranda e Fonseca,MIRANDA, V. e FONSECA, N. "EPSO-evolutionary particle2002b]swarm optimization, a new algorithm with applications in powersystems".Transmission and Distribution Conference andExhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES Vol. 2, pp. 745-750. 6-10Out. 2002.
- [Miranda e Fonseca,MIRANDA, V. e CALISTO, P. "New Evolutionary Particle Swarm2002c]Algorithm (EPSO) applied to Voltage/var Control". 14th PSCC –
Power System Computation Conference. Sevilla, Jun. 2002.
- [Miranda et. Alli, 2007] MIRANDA, V. et. Alli. "An Improved Fuzzy Inference System for Voltage/var Control". Power Systems, IEEE Transactions On. Vol. 22. pp. 2013-2020. Nov. 2007.
 - [Monticelli, 1983] MONTICELLI, A. "*Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*". Primeira Edição. Editora Edgard Blücher. 1983.
- [Nielsen e Markushevich, NIELSEN, R. E. e MARKUSHEVICH, N. "Dynamic System Load
 Control through Use of Optimal Voltage and Var Control". IEEE
 Industry Applications Dynamic Modeling Control Applications for
 Industry Workshop. Vol. 1, pp. 29-32. Maio 1998.
 - [O'Gorman e Redfern,O'GORMAN, R. e REDFERN, M. A. "Voltage Control Problems2004]on Modern Distribution Systems". IEEE Power Engineering SocietyGeneral Meeting 2004, Vol. 1, pp. 662-667.
 - [Rahideh e Shaheed,RAHIDEH, A. e SHAHEED, M. H. "Hybrid Fuzzy-PID-based2006]Control of a Twin Rotor MIMO System". IEEE IndustryElectronics, IECON 2006. pp.48-53. Nov. 2006.
 - [Ramakrishna e Rao,
 RAMAKRISHNA, G. e RAO, N. D. "Fuzzy inference system to assist the operator in reactive power control in distribution systems". IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution. Vol. 145. Issue 2. pp. 133-138. Mar. 1998.

[Ramakrishna e Rao, RAMAKRISHNA, G. e RAO, N. D. "Implementation of a Fuzzy

- 1999] Logic Scheme for Q/V Control in Distribution Systems". Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE. Vol. 2. pp.1316-1321. Feb 1999.
- [Roytelman e Ganesan, ROYTELMAN, I. e GANESAN, V. "Modeling of local controllers in distribution network applications". IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. 15. Issue 4. pp. 1232 – 1237. Out. 1999.
- [Roytelman e Ganesan,ROYTELMAN, I. e GANESAN, V.; "Coordinated local and
centralized control in distribution management systems". IEEE
Transaction on Power Delivery. Vol. 15, Issue 2. pp. 718-724. Abr.
2000.
- [Roytelman et. Alli, 1995] ROYTELMAN, I et. Alli. "volt/var control algorithm for modern distribution management systems". Power Systems, IEEE Transactions On. Vol. 10. pp. 1454-1460. Ago.1995.
- [Roytelman et. Alli, 1998] ROYTELMAN, I. et. Alli. "Pilot project to estimate the centralized volt/var control effectiveness". IEEE Transaction on Power Systems. Vol. 13, Issue 3. pp. 864 – 869. Ago. 1998.
- [Salama e Chikhani, 1992] SALAMA, M. M. A. e CHIKHANI, A. Y. "An Expert System For Reactive Power Control Of A Distribution System; Part 1: System Configuration". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 7. Issue 2. pp. 940-945. Abr. 1992.
 - [Shaw e Simões, 1999] SHAW, I. S. e SIMÕES, M. G. "Controle e Modelagem Fuzzy". Edgard Blücher Ltda. Primeira Edição. 1999.
 - [Srinivas, 2000] SRIVINAS, M. S. "Distribution Load Flows: A Brief Review". Proceedings of the 2000 IEEE PES Summer Meeting. Jan. 2000.
 - [Su e Lin, 1996] SU, C-T. e LIN, C-T. "A new fuzzy control approach to voltage profile enhancement for power system". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 11, NO. 3, pp. 1654-1659. Ago. 1996.
 - [Thatte e Ilic, 2006] THATTE, A. A. e ILIC, M. D. "An assessment of reactive power/voltage control devices in distribution networks". IEEE

- [Yokoyama et. Alli, 1993] YOKOYAMA, R. et. Alli. "A coordinated control of voltage and reactive power by heuristic modeling and approximated reasoning". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 8. Issue 2, pp. 636-645. Maio. 1993.
- [Yoshida et. Alli, 2000] YOSHIDA, H. et. Alli. "A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment". IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 15, Issue 4. pp.1232 - 1239. Nov. 2000.