

Djonathan Luis Fassbinder

# **Controle Volt/VAr utilizando geração distribuída em redes de distribuição**

Alegrete, RS

01 de Dezembro de 2016



Djonathan Luis Fassbinder

## **Controle Volt/VAr utilizando geração distribuída em redes de distribuição**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Universidade Federal do Pampa – Unipampa

Curso de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Me. Ana Paula Carboni de Mello

Alegrete, RS

01 de Dezembro de 2016

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

F249c Fassbinder, Djonathan Luis

Controle Volt/VAR utilizando geração distribuída em redes  
de distribuição / Djonathan Luis Fassbinder.

75 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2016.

"Orientação: Ana Paula Carboni de Mello".

1. Controle centralizado. 2. Lógica Fuzzy. 3. Rede de  
distribuição. 4. Smart Grid. 5. Controle Volt/VAR. I. Título.

DJONATHAN LUIS FASSBINDER

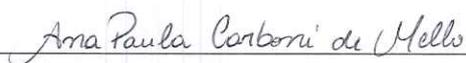
CONTROLE VOLT/VAR UTILIZANDO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO

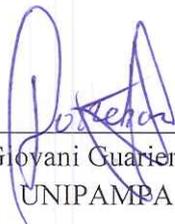
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal do Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Elétrica.

Área de Concentração:

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 1 de dezembro de 2016.

Banca examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Me. Ana Paula Carboni de Mello  
Orientadora

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Giovani Guarienti Pozzebon  
UNIPAMPA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Wagner Maciel Kaehler  
UNIPAMPA



*Dedico este trabalho a todos que usufruem e ainda buscam conhecimento para fazer da sua vida e a do próximo melhor, onde desenvolvam e aprimorem suas técnicas para o bem de todos.*



# Agradecimentos

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe, que me incentivou incondicionalmente todos os anos que estive na faculdade. Agradeço aos colegas do GESEP, que me apoiaram a concluir este trabalho. A minha orientadora Ana Paula Mello, pelo suporte, suas correções e incentivos.

Agradeço aos meus amigos, Arielly Rodrigues, Denise Soldera, Fabiana Lagoas, Fernanda Nunes, Jacqueline Batistella, Juliano Fagundes, Priscila Spanemberg, Rodrigo Oliveira, Sabrina Tolfo e Susy Ataíde, que me ajudaram nessas horas difíceis e que compreenderam certas ausências. Agradeço também aos colegas da empresa COPEL, pela oportunidade de estágio, onde adquiri conhecimentos que contribuíram para este trabalho e para o desenvolvimento profissional. E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.



*“A mente que se abre a uma nova ideia  
jamais voltará ao seu tamanho original.”  
(Albert Einstein)*



# Resumo

Este documento apresenta uma estratégia centralizada de controle de tensão e potência reativa (Volt/VAr) para um sistema de distribuição utilizando conceitos de redes elétricas inteligentes (Smart Grids). A metodologia desenvolvida atua como um módulo de controle inteligente dos equipamentos dispostos no sistema de distribuição, que são, banco de capacitores, reguladores de tensão e transformadores. Como os níveis de tensão dependem do fluxo de potência reativa do sistema elétrico, a geração distribuída irá atuar como um dispositivo regulador de tensão para o controle Volt/VAr, por ter a capacidade de injeção/absorção de potência reativa no sistema. Com a realização do controle Volt/VAr, tem-se a melhoria dos níveis de tensão, redução das perdas de energia em condições normais de operação e o aumento da expectativa de vida dos equipamentos do sistema de distribuição. A solução do problema de controle Volt/VAr é baseada na lógica Fuzzy, onde procura-se a otimização conjunta e coordenada dos equipamentos de controle existentes no sistema. Os resultados mostram-se eficientes com a geração distribuída atuando como um dispositivo de controle de tensão e são apresentados para uma rede teste IEEE 34 barras.

**Palavras-chave:** Controle centralizado, Lógica Fuzzy, Rede de distribuição, Smart Grid.



# Abstract

This document presents a centralized strategy of voltage control and reactive power (Volt/VAr) to a distribution system using concepts of smart grids. The methodology developed acts as an intelligent control module of the equipment arranged in the distribution system, which are capacitor banks, voltage regulators and transformers. Voltage levels depend on the reactive power flux of the electrical system, distributed generation will act as a regulating device voltage for the Volt/VAr control, by having reactive power injection/absorption system capacity. With the completion of Volt/VAr control, it has improved voltage levels, reduction of power losses under normal operating conditions and also increases the lifetime of the distribution system equipments. The solution of Volt/VAr control problem is based on fuzzy logic, which seeks to joint and coordinated optimization of existing control equipment in the system. The results show to be efficient with distributed generation acting as a voltage control device and are presented to a test network IEEE 34 bus.

**Key-words:** Centralized control, Fuzzy Logic, Distribution Network, Smart Grid.



# Lista de ilustrações

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Esquema da comutação de tap realizada pelo regulador de tensão. . . .   | 30 |
| Figura 2 – Diagrama unifilar do banco de capacitor instalado em paralelo a rede. .   | 30 |
| Figura 3 – Esquema de comutação de tap's de um transformador de distribuição. .  | 31 |
| Figura 4 – Função de controle de um inversor. . . . .  | 32 |
| Figura 5 – Variável linguística temperatura. . . . .   | 37 |
| Figura 6 – Função de pertinência na (a) Teoria Clássica (b) Teoria Difusa. . . . .   | 37 |
| Figura 7 – Função triangular e trapezoidal, respectivamente. . . . .   | 38 |
| Figura 8 – Função de gauss simples, gauss composta e função sino, respectivamente.   | 38 |
| Figura 9 – Função sigmóide simples, a diferenciação e produto de funções sigmói-<br>des, respectivamente. . . . .  | 39 |
| Figura 10 – Função de pertinência polinomial aberta a esquerda, função com ele-<br>vação centrada e função de pertinência polinomial aberta a direita,<br>respectivamente. . . . . | 39 |
| Figura 11 – Blocos de um sistema de inferência fuzzy. . . . .  | 40 |
| Figura 12 – Conjunto fuzzy para altura. . . . .  | 41 |
| Figura 13 – Processo de Desfuzzyficação pelo método centróide. . . . .   | 42 |
| Figura 14 – Estratégia de controle de tensão e potência reativa. . . . .   | 43 |
| Figura 15 – Diagrama simplificado para obtenção da matriz de efetividade. . . . .  | 44 |
| Figura 16 – Cascata dos controladores fuzzy. . . . .   | 46 |
| Figura 17 – Diagrama simplificado para obtenção da matriz de perdas. . . . .   | 47 |
| Figura 18 – Editor dos controladores Fuzzy. . . . .  | 48 |
| Figura 19 – Funções de pertinência da saída <i>Poder de Controle</i> . . . . .   | 49 |
| Figura 20 – Modelo completo com a utilização de controladores fuzzy em um sistema<br>real. . . . .   | 50 |
| Figura 21 – Rede teste IEEE 34 barras. . . . .   | 51 |
| Figura 22 – Curvas de carga da subestação de potência ativa. . . . .   | 54 |
| Figura 23 – Curvas de carga da subestação de potência reativa. . . . .   | 54 |
| Figura 24 – Curva de carga residencial. . . . .  | 55 |
| Figura 25 – Curva de carga industrial. . . . .   | 55 |
| Figura 26 – Tensões nas 24 horas na barra 838 através do controle por efetividade.   | 57 |
| Figura 27 – Tensões nas 24 horas na barra 840 através do controle por efetividade.   | 57 |
| Figura 28 – Tensões nas 24 horas na barra 890 através do controle por efetividade.   | 58 |
| Figura 29 – Tensões nas 24 horas na barra 844 através do controle por efetividade.   | 58 |
| Figura 30 – Curvas de potência reativa final através do controle por efetividade. . .  | 59 |
| Figura 31 – Tensões nas 24 horas na barra 838 através do controle por perdas. . . .  | 61 |
| Figura 32 – Tensões nas 24 horas na barra 840 através do controle por perdas. . . .  | 62 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 33 – Tensões nas 24 horas na barra 890 através do controle por perdas. . . . | 62 |
| Figura 34 – Tensões nas 24 horas na barra 844 através do controle por perdas. . . . | 63 |
| Figura 35 – Curvas de potência reativa final através do controle por perdas. . . .  | 63 |
| Figura 36 – Tensões nas 24 horas na barra 838 através do controle combinado. . . .  | 65 |
| Figura 37 – Tensões nas 24 horas na barra 840 através do controle combinado. . . .  | 66 |
| Figura 38 – Tensões nas 24 horas na barra 890 através do controle combinado. . . .  | 66 |
| Figura 39 – Tensões nas 24 horas na barra 844 através do controle combinado. . . .  | 67 |
| Figura 40 – Curvas de potência reativa final através do controle combinado. . . .   | 67 |

# Lista de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Mapa de Regras do Controlador 1 . . . . .                              | 47 |
| Tabela 2 – Mapa de Regras do Controlador 2 . . . . .                              | 48 |
| Tabela 3 – Características dos Equipamentos utilizados no controle Volt/VAr . . . | 52 |
| Tabela 4 – Comprimentos das linhas da rede IEEE 34 barras . . . . .               | 52 |
| Tabela 5 – Carga Distribuída . . . . .  | 53 |
| Tabela 6 – Comportamento dos Equipamentos através do Controle por Efetividade     | 56 |
| Tabela 7 – Comportamento dos Equipamentos através do Controle por Perdas . .      | 60 |
| Tabela 8 – Comportamento dos Equipamentos através do Controle Combinado . .       | 64 |



# Sumário

|          |                                    |           |
|----------|------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                  | <b>21</b> |
| 1.1      | Motivação e Justificativa          | 21        |
| 1.2      | Objetivos                          | 22        |
| 1.2.1    | Objetivo Geral                     | 22        |
| 1.2.2    | Objetivo Específico                | 23        |
| 1.3      | Organização dos capítulos          | 23        |
| <b>2</b> | <b>Revisão Bibliográfica</b>       | <b>25</b> |
| 2.1      | Estratégias do Controle Volt/VAr   | 27        |
| 2.1.1    | Controle Local                     | 27        |
| 2.1.2    | Controle Centralizado              | 27        |
| 2.2      | Dispositivos de Controle           | 28        |
| 2.2.1    | TAP de transformadores de potência | 28        |
| 2.2.2    | Regulador de Tensão                | 29        |
| 2.2.3    | Banco de Capacitores               | 29        |
| 2.2.4    | Transformador de Distribuição      | 31        |
| 2.2.5    | Geração Distribuída                | 31        |
| <b>3</b> | <b>Lógica Fuzzy</b>                | <b>35</b> |
| 3.1      | Introdução                         | 35        |
| 3.2      | Conjuntos Fuzzy                    | 35        |
| 3.3      | Variável Linguística               | 36        |
| 3.4      | Funções de Pertinência             | 37        |
| 3.5      | Sistema de Inferência              | 39        |
| 3.5.1    | Regras                             | 39        |
| 3.5.2    | Inferência                         | 40        |
| 3.5.3    | Fuzzyficação                       | 41        |
| 3.5.4    | Defuzzyficação                     | 41        |
| <b>4</b> | <b>Metodologia</b>                 | <b>43</b> |
| 4.1      | Arquitetura Geral                  | 43        |
| 4.2      | Etapas Controle Volt/VAr           | 44        |
| 4.2.1    | Matriz Efetividade                 | 44        |
| 4.2.1.1  | Processo de Cálculo                | 44        |
| 4.2.2    | Controladores Fuzzy                | 46        |
| 4.2.3    | Ação de Controle                   | 49        |
| <b>5</b> | <b>Resultados</b>                  | <b>51</b> |
| 5.1      | Rede Teste 34 barras               | 51        |
| 5.1.1    | Dados Elétricos                    | 51        |

|          |                                       |           |
|----------|---------------------------------------|-----------|
| 5.2      | Curva de Cargas . . . . .             | 53        |
| 5.3      | Resultados de Simulação . . . . .     | 54        |
| 5.3.1    | Controle por Efetividade . . . . .    | 54        |
| 5.3.2    | Controle por Perdas . . . . .         | 60        |
| 5.3.3    | Controle Combinado . . . . .          | 64        |
| <b>6</b> | <b>Considerações finais . . . . .</b> | <b>69</b> |
| 6.1      | Trabalhos Futuros . . . . .           | 70        |
|          | <b>Referências . . . . .</b>          | <b>71</b> |

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação e Justificativa

Nos últimos anos, as concessionárias passaram por mudanças em relação à qualidade dos serviços prestados. Com o acréscimo registrado da demanda por energia, os investidores do setor privado foram atraídos para o setor elétrico, tornando o mercado de energia elétrica mais competitivo, e aumentando as exigências de qualidade e continuidade no fornecimento da energia elétrica entregue aos consumidores. Com a grande demanda buscou-se alternativas para redução de custos na prestação de serviços, como a utilização de geradores distribuídos, que possuem a vantagem de estar localizado próximo as cargas, atendendo os consumidores.

A falta de energia elétrica impacta diretamente na rotina dos consumidores, já que é utilizada para iluminação, climatização, produção de trabalho mecânicos, telecomunicações, entre outros, como também afeta índices de qualidade e continuidade dos serviços prestados pelas concessionárias. Níveis de tensão inadequados podem causar danos, ou operação indesejada de equipamentos.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável por fiscalizar e regular as concessionárias em sistemas de distribuição de energia (SDE). De acordo com o módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), os indicadores utilizados associados à qualidade de serviço e produto são: indicadores individuais e coletivos de continuidade, indicadores de conformidade do nível de tensão, tempos médios de atendimento às ocorrências emergenciais e segurança do trabalho e das instalações.

Os níveis de tensão dependem do fluxo de potência reativa do sistema elétrico. Quando a rede esta com escassez de potência reativa, o nível de tensão cai, já o excesso eleva o nível de tensão. A maioria das cargas instaladas, possuem uma porcentagem indutiva (absorvem potência reativa), já bancos de capacitores geram potência reativa (VAr) assim como os condutores de linhas de transmissão, que por sua capacitância entre os condutores e o solo geram VAr (LIMA, 2007).

No sistema de distribuição, o fluxo de potência reativa pode gerar flutuações de tensão ou conhecido também como *flicker*, que é a variação de do valor da tensão, podendo ser sub ou sobretensão. A ocorrência desses fenômenos podem ser causados por grandes cargas que consomem um elevado volume de potência reativa (cargas industriais), que causa afundamento de tensão da rede. Outros fatores que causam as flutuações são chaveamento de cargas pesadas, partidas de motores, manobras na rede e problemas no sistema de

geração. Outro fato que contribui para esse fenômeno são as ligações clandestinas e a sazonalidade no verão, que aumenta o número de funcionamento de ar condicionados no sistema, aumentando a potência exigida pelo alimentador, tendo como consequência um aumento do pico das curvas de cargas.

Portanto, controlam-se os níveis de tensão em um sistema elétrico administrando a geração, a absorção do fluxo de potência reativa na rede. Para efetuar o controle de tensão utilizam-se equipamentos de controle de tensão presentes no sistema elétrico (capacitores, compensadores síncronos, transformadores, reguladores de tensão, etc).

Tecnologias de monitoramento, controle e comunicação nas redes elétricas estão evoluindo e os equipamentos básicos de engenharia como reguladores de tensão, bancos de capacitores, transformadores estão incorporando novas funcionalidades, como a disponibilidade de informação a partir dos sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) e possibilidade de ajustes “on-line”, pela interação e troca de informações entre os componentes e equipamentos. De acordo com Alexis e Rodezno (2014) as concessionárias conseguem uma melhor operação do sistema com as redes inteligentes (*Smart grids*), podendo gerenciar a ação de cada equipamento disposto no SDE de acordo com a demanda estabelecida, possibilitando significativas melhorias nas redes de distribuição.

A realização do controle de tensão e potência reativa (Controle Volt/VAr), a partir dos equipamentos de um sistema de distribuição é essencial para manter a tensão em níveis adequados em todos os pontos do alimentador de distribuição, considerando as mais diversas condições de operação do sistema (IBRAHIM; SALAMA, 2015). O controle Volt/VAr é uma das funções mais importantes e desejadas no âmbito de sistemas de Automação de Distribuição Avançada (DA) e DMS (*Distribution Management System*) (RAHIMI; MARINELLI; SILVESTRO, 2012).

A decisão de quando e qual equipamento atuar, no controle Volt/VAr, depende principalmente, da influência dos ajustes do dispositivo no sistema (LIMA, 2007). O controle coordenado não é uma tarefa fácil, pois atualmente as redes são pouco automatizadas e apresentam poucos recursos de comunicação entre os dispositivos e o centro de operação e controle.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um algoritmo para o controle Volt/VAr de um sistema elétrico de distribuição utilizando os equipamentos dispostos no sistema elétrico de distribuição com a colaboração da geração distribuída.

### 1.2.2 Objetivo Específico

- Estudar os equipamentos de regulação de tensão no sistema de distribuição;
- Estudar as estratégias para controle inteligente de equipamentos de regulação de tensão;
- Aplicar o sistema de inferência fuzzy para o controle Volt/VAr;
- Realizar controle de tensão e potência reativa no sistema de distribuição;
- Utilizar a geração distribuída, como um dispositivo de regulação de tensão, com a injeção/absorção de potência reativa, para o controle Volt/VAr do sistema de distribuição.

## 1.3 Organização dos capítulos

O trabalho está dividido em seis capítulos. O Capítulo 1 retrata a introdução sobre o assunto e objetivo geral e específico do trabalho. O Capítulo 2 apresenta a revisão sobre a implementação do controle Volt/VAr em sistemas de distribuição de energia elétrica, além de demonstrar os equipamentos de controle de tensão que efetuam este controle.

O Capítulo 3, apresenta uma visão geral sobre a *Lógica Fuzzy*, com o objetivo de demonstrar como a lógica será interpretada para a solução de problema de tensão em rede de distribuição de energia. O Capítulo 4 apresenta a metodologia proposta do trabalho, descrevendo as etapas de todo o processo para o controle Volt/VAr.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos, a partir de um sistema teste, através de simulações realizadas. O Capítulo 6, demonstra as considerações finais, e propostas de trabalhos futuros.



## 2 Revisão Bibliográfica

Neste trabalho é dada ênfase ao controle de tensão e potência reativa em sistemas de distribuição. Ressalta-se que o problema de controle de tensão e potência reativa (Volt/VAr) é de difícil tratamento devido à sua natureza combinatória e a dificuldade na formulação matemática das restrições usadas para modelar o comportamento dos elementos do sistema, como cargas e equipamentos, tornando a escolha das ações de controle adequadas, uma tarefa extremamente complexa.

Os autores Krok e Genc (2011) apresenta uma abordagem coordenada para otimização de controle Volt/VAr para grandes redes de distribuição de energia, no qual o algoritmo configura os tap's de Transformadores (LTCs - *Load Tap Changers*) e/ou reguladores de tensão. m

O controle Volt/VAr está emergindo como uma solução acrescentada a instalação de geração distribuída. Kim, Member e Harley (2014) descrevem um estudo para alocação e as capacidades da GD sistemas em redes de distribuição na carga de pico e analisar o impacto na mesma para o controle Volt/VAr utilizando algoritmos genéticos para obter a melhor resposta. O controle Volt/VAr é feito com altos níveis de penetração das energias renováveis no sistemas de distribuição, utilizando fazendas solares e eólicas, no qual a abordagem é diferente, usando apenas GD para o controle, não fazendo o uso de outros tipos de equipamentos reguladores de tensão (VAZIRI et al., 2012).

Os inversores utilizados na geração distribuída também têm sido sugeridos como um meio de proporcionar a geração de potência reativa e o consumo necessário para a manutenção de regulação de tensão, e podem, portanto, servir como uma ferramenta adicional para a implementação do controle Volt/VAr, principalmente devido a sua capacidade de variar a potência reativa rapidamente.

A literatura propõem vários métodos e técnicas para a realização do controle Volt/VAr. Alguns autores fazem uso de Programação Dinâmica (PD), no qual a GD participa ativamente das ações de controle juntamente com outros dispositivos, atenuando as variações da tensão nas cargas. Kim et al. (2013) demonstra que a GD pode atenuar os efeitos das variações de carga de demanda na tensão de rede utilizando dois algoritmos PD diferentes onde o método proposto foi implementado com MATLAB. Lu e Hsu (1995) utilizam a PD para despachar adequadamente os capacitores em derivação e comutadores sob carga na subestação de distribuição com base na previsão de cargas horárias de um transformador.

Park e Nam (2007) utilizam algoritmos genéticos (AG) para o controle coordenado do Transformador de Tap sob Carga (LTC) e de bancos de capacitores, considerando

correções na tensão de referência em tempo real por tensões obtidas com previsões de carga, mostrando que o método pode preservar os equipamentos reduzindo o número de operação e minimizar as perdas de energia.

Uma abordagem híbrida utilizando o método de pontos interiores primal-dual (PDIPM) e algoritmos genéticos é apresentada em Mohapatra et al. (2014), limitando o número de combinações e sequências de controle para operação de LTC e chaveamentos de bancos de capacitores, com a técnica meta-heurística, pode-se melhorar o tempo de resposta computacional das soluções em 30-35 vezes mais rápida e é geralmente mais preciso e confiável do que o AG convencional, foi testado para uma rede teste de 69 e 119 barras.

Método como Busca Heurística, são amplamente utilizados em técnicas de planejamento de operações de distribuição demonstrado em Carvalho e Ferreira (2002), que utiliza a técnica em bancos de capacitores e tap de transformadores em um período de 24 horas. Com os mesmo equipamentos, Ulinuha, Masoum e Islam (2008) apresentam algoritmo evolucionário que é capaz de otimizar os sistemas de distribuição com diferentes tipos de cargas não-lineares, para minimizar a perda de energia e melhorar o perfil de tensão da rede.

A Lógica Fuzzy, também tem sido utilizados para solução do problema de controle Volt/VAr. Em especial, o uso de lógica fuzzy tem se mostrado uma das técnicas mais bem sucedidas de tecnologias atuais para aplicação em sistemas de controle on-line, Liang e Wang (2003), utilizam a lógica difusa para o controle Volt/VAr em um sistema de distribuição, que tem objetivo de encontrar uma combinação de posições pro transformador LTC (*Load Tap Changer*) e capacitores para minimizar o custo de reparação do sistema, no qual número total de operações de comutação do LTC e de capacitores em um dia deve ser o mínimo possível.

Miranda e Calisto (2002) utilizam a lógica difusa para realizar um controle conjunto dos equipamentos dispostos no sistema, incluindo a GD como um equipamento de regulação de tensão.

## 2.1 Estratégias do Controle Volt/VAr

De acordo com Meier (2013) existem diferentes maneiras de realizar o controle Volt/VAr em um sistema de distribuição, o local ou independente e o modelo integrado ou centralizado. O método independente, é o mais utilizados, porém o centralizado é o controle com maior efetividade para um sistema com significativa presença de geração distribuída (GD) na rede.

### 2.1.1 Controle Local

Controladores locais são amplamente utilizados no sistema de distribuição de energia. (ROYTELMAN; GANESAN, 2000). O controle local ou independente, é determinado quando um equipamento de controle tem a capacidade de responder as perturbações na sua área de atuação. O sistema local tem como as principais vantagens a simplicidade e custo, pois não existem sistemas de comunicações, logo cada equipamento atua de forma independente, sendo eles: transformadores, LTC's (*Load Tap Changer*), banco de capacitores e reguladores de tensão. Então as atuações de cada equipamento dependerá do perfil de carga e variações de tensões na rede, no entanto a falta de controle central pode permitir que violações passem despercebido, também podendo haver a atuação indevida dos equipamentos.

Turitsyn et al. (2011) apresentam abordagens centralizadas e locais para o controle da potência reativa, mostrando que, para uma rede de distribuição realista. Os controles locais que atuam sobre as variáveis locais não irão sofrer de latência e são muito menos vulneráveis porque não dependem de comunicação para o seu funcionamento. Para o tipo de controle centralizado, devido à dependência de comunicação a latência pode comprometer o desempenho durante as rápidas mudanças na rede.

Existem várias limitações para o controle local, de acordo com Meier (2013) o controle local pode manter a tensão em nível aceitável através de um alimentador, mas com o aumento de penetração de GD, pode-se tornar cada vez mais problemático. Com a falta de comunicação entre os equipamentos, pode haver que um dispositivo possa contrariar outro, gerando instabilidade na rede de distribuição. O controle local pode manter a tensão em níveis dentro do estabelecido, porém para se ter sistemas mais eficientes e otimizados, esta técnica não é adequada.

### 2.1.2 Controle Centralizado

Com o aumento de operações inteligentes a Smart Grid (rede inteligente) é uma solução existente, uma vez que são sistemas provido de recursos de Tecnologia da Informação (TI) e de elevado grau de automação. Com sistema de comunicação e equipamentos

controláveis, no qual permite a coordenação de todos os elementos para atingir um objetivo, que é a regulação de tensão no sistema global.

Atualmente o nível de automação de redes de distribuição elétrica, proporciona um número de elementos controlados e monitorados ainda maior, no qual se desenvolve e impulsiona o uso do controle centralizado.

Para Bremermann (2008) os controladores devem ter capacidade de operar na sua área atuação, sem interferir no controlador central. O controlador central tem a hegemonia sobre os equipamentos do sistema para mudar a estratégia dos controladores locais, afim de assegurar a tensão global da rede em níveis adequados.

Fuentes (2009) faz uso do controle central para realizar controle Volt/VAr utilizando inferência fuzzy para subestações de distribuição em sistemas isolados de energia. O controle centralizado já vem sendo utilizado a mais de vinte anos por Lugtu e Ieee (1995). Recentemente, o trabalho de Salles, Pinto e Freitas (2016) utilizam o controle integrado para fazer o controle Volt/VAr baseado em máquinas de vetores de suporte.

O trabalho de (ROYTELMAN; GANESAN, 2000) se baseia na análise de controladores locais e centralizados, avaliando os impactos sobre o sistema de distribuição, no qual propõe a interação dos controladores locais com as funções centralizadas para como objetivo coordenar o controle Volt/VAr, no qual os controles agindo de forma independente podem também alcançar o objetivo.

## 2.2 Dispositivos de Controle

Em geral, pode-se dizer que o problema de controle de tensão em redes de distribuição consiste em buscar uma estratégia conjunta de operação dos equipamentos. Dessa forma, é necessário identificar todos os recursos dos dispositivos de controle, para elencar as possíveis alterações que poderão ser efetivadas na melhoria das condições de operação do sistema, dentro de um contexto global, respeitando as restrições operacionais e limites técnicos dos dispositivos.

A seguir, é demonstrada a modelagem dos equipamentos utilizados para a realização do controle Volt/VAr.

### 2.2.1 TAP de transformadores de potência

Uma das principais estratégias para o controle de tensão em sistemas de distribuição é a regulação da tensão através da comutação das derivações ou TAP's (Transformer Adjust Position) dos transformadores sob carga LTC (Load Tap Change) instalados nas subestações de distribuição.

A comutação dos TAP's do LTC pode ser acionada em função das variações de carga nos alimentadores, que modificam o perfil tensão no sistema. O ajuste na magnitude de tensão do LTC pode variar na faixa de 10% do valor da tensão de referência, sendo realizado com o auxílio do relé regulador de tensão automático (função ANSI 90), que monitora o valor da tensão de saída no enrolamento secundário do transformador e o compara com o seu valor de ajuste.

Para o transformador com mudança de tap sob carga, a mudança de tap, pode ser realizada tanto na forma manual quanto automática.

Quando necessário, o relé 90 aciona o comutador de TAP para manter o valor da tensão em um nível constante, dentro de uma faixa pré-estabelecida, o valor de tensão é mantido até um nó de referência, ou centro de carga. Pode ser calculado como

$$v_{out} = v_{ref} \frac{v_p}{v_s} \quad (2.1)$$

sendo  $v_{ref}$  o valor da tensão do equipamento dentro da faixa de ajuste disponível,  $v_p$  e  $v_s$  a tensão no enrolamento primário e secundário, respectivamente.

Além da tensão de referência, outras estratégias que podem ser ajustadas no relé 90 são: os limites de tensão, a temporização para que se inicie as comutações de TAP's e a compensação da queda de tensão da linha considerando o centro de carga.

### 2.2.2 Regulador de Tensão

Os reguladores de tensão (RT) são autotransformadores, que tem por função elevar ou abaixar a tensão para manter a qualidade dos níveis de energia dentro de limites estabelecidos. Para que esteja nos níveis aceitáveis a tensão de entrada do regulador é elevada até que a tensão de saída atinja esta faixa.(MADRUGA, 2011). Os RT's ajustam a tensão da rede em uma faixa de  $\pm 10\%$  em 32 posições taps, onde cada tap representa 0,625% (16 deles positivos e o restante negativo, essa mudança de polaridade só é possível através de uma chave de controle que permite esta reversão (K1 e K2) como demonstrado na Figura 1.

O regulador de tensão é um dos equipamentos mais utilizados para manter a qualidade dos níveis de tensão em um sistema de distribuição, seja ela redes rurais ou urbanas, estes dispositivos são aplicados em pontos ao longo do alimentador em que a tensão não consegue ser regulada pela subestação.

### 2.2.3 Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores são utilizados para compensação de reativos, gerado por cargas indutivas ou reatância de linhas. São alocados nas subestações de energia ou ao

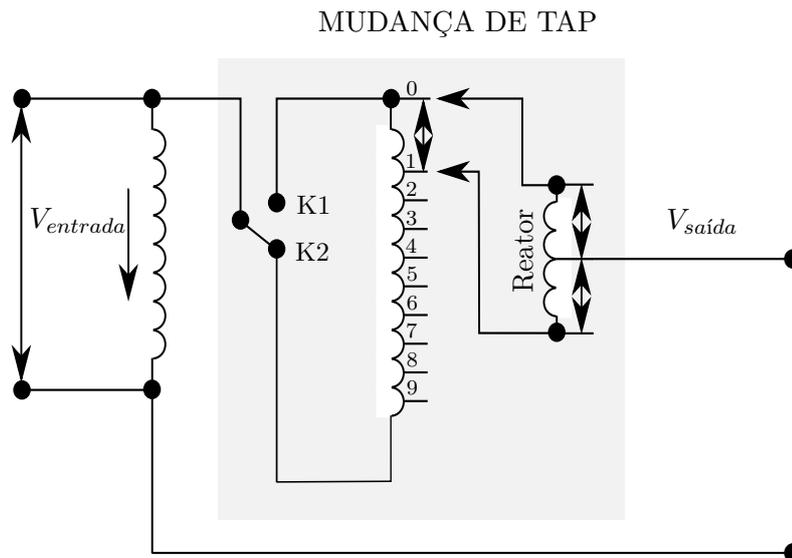


Figura 1 – Esquema da comutação de tap realizada pelo regulador de tensão.

longo dos alimentadores de distribuição.

Os capacitores são instalados em paralelo (Figura 2), fornecendo energia reativa capacitiva ao sistema, tendo como função a correção do fator de potência, acarretando a melhoria nos níveis de tensão (MADRUGA, 2011).

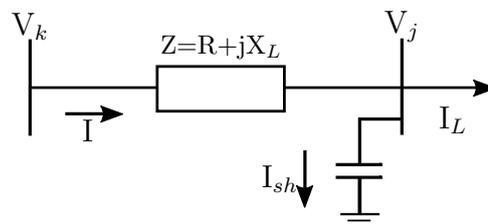


Figura 2 – Diagrama unifilar do banco de capacitor instalado em paralelo a rede.

Como principal vantagem possuem aquisição de baixo custo associado a versatilidade de operação para melhorar os limites de estabilidade de valores de tensão, também melhoram a distribuição de cargas, reduzindo as perdas globais no sistema.

Para qualquer valor de tensão aplicado ao banco de capacitores, a potência reativa gerada em kVAr será dada por

$$Q = \frac{V^2}{X_c} \quad (2.2)$$

sendo  $V$  a tensão aplicada ao banco de capacitor (kV) e  $X_c$  a reatância capacitiva do banco de capacitor ( $\Omega$ ).

### 2.2.4 Transformador de Distribuição

Os transformadores tem como função reduzir a tensão primária, ou média tensão, para a de distribuição secundária, ou baixa tensão. Esses equipamentos são geralmente fabricados com três derivações ou tap's, podendo chegar em até sete posições para manter a tensão em níveis aceitáveis (MADRUGA, 2011).

As posições dos tap's possuem 5% entre elas, o primeiro tap sendo o nominal, o segundo com 0,95 pu e a posição tap 3 apresenta 10% abaixo da tensão nominal ou representando 0,90 pu. A Figura 3 representa a comutação dos tap's do transformador de distribuição.

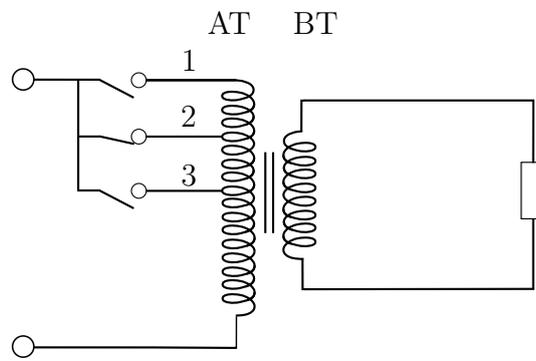


Figura 3 – Esquema de comutação de tap's de um transformador de distribuição.

Os transformadores de distribuição para realizar a comutação de tap, é necessário que o mesmo seja desligado para poder comutar, pois os tap's estão imersos no óleo na parte interna do equipamento. Hoje em dia os transformadores já são fabricados com a comutação na parte externa, facilitando o acesso. Como as trocas entre as derivações são realizadas manualmente envolvendo equipes e custos com mão de obra adicionais, o transformador não foi utilizado para fins de simulações para o controle Volt/VAr. Logo outros equipamentos irão atuar para melhoria de tensão da rede, para que o transformador não seja desligado e ainda evitando a contaminação do óleo no interior do equipamento, pelo fato que é necessário abri-lo para realizar a comutação (PEREIRA; COSTA, 2009).

### 2.2.5 Geração Distribuída

A geração distribuída (GD) pode ser definida como uma fonte de energia conectada diretamente no sistema elétrico ou próximo ao consumidor. Com mudanças no cenário econômico, as GD's são instaladas para minimizar impactos ambientais e fazendo desnecessárias a implementação de linhas de transmissão de longas distâncias. Os geradores podem absorver ou injetar potência reativa conforme o ajuste (ALEXIS; RODEZNO, 2014).

Os sistemas de energia solar fotovoltaica ou de turbinas eólicas em uma rede de distribuição, possuem inversores no qual podem dar suporte de energia reativa mesmo a noite ou quando não houver vento, pois a injeção de VAR é mais rápida do que os equipamentos eletromecânicos convencionais. Logo para contribuir para solucionar as flutuações de tensão da rede, os inversores atuam de forma mais rápida, já que os inversores já estão instalados nas GD's.

A Figura 4, representa o inversor injetando ou absorvendo potência reativa, ou seja fornecendo reativo capacitivo ou indutivo, dentro dos limites máximos de potência da tensão detectada localmente (MEIER, 2013).

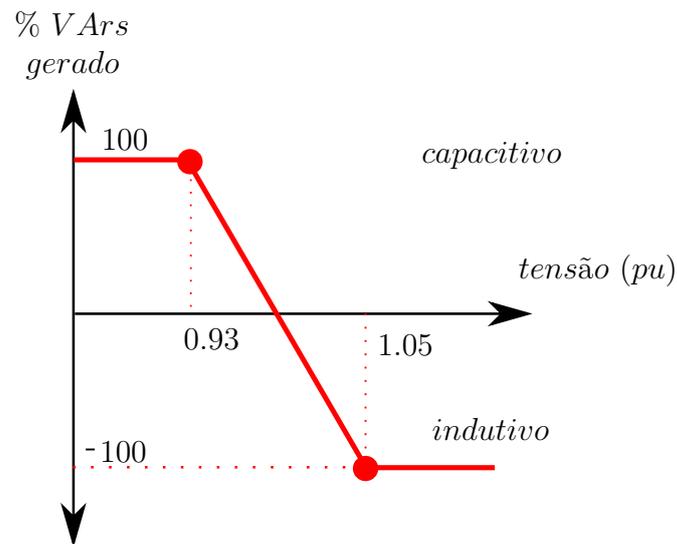


Figura 4 – Função de controle de um inversor.

O trabalho de Jahangiri et al. (2013) trás um controle Volt/VAr distribuído através de inversores de PV, no qual as tensões da rede podem ser controladas com eficácia dentro dos limites em todos os casos analisados. Já o trabalho de Farivar et al. (2012) demonstra os benefícios do controle de reativo em um sistema de distribuição com alta penetração de PV, minimizando as perdas.

Os limites de penetração são definidos em relação ao impacto que as GD's tem sobre a tensão da rede. A referência Smith et al. (2011) trata de cenários de alta penetração de PV, sem afetar a qualidade da energia ou a confiabilidade, logo os recursos distribuídos podem fornecer apoio adequado para variações de tensão, onde as simulações são feitas no *OpenDSS*, software que será utilizado também para as simulações desta monografia.

O controle Volt/VAr a partir da GD é o principal foco deste trabalho. A GD é modelada como uma barra PV (potência e tensão constante), e mesmo quando não produz potência ativa pode realizar a injeção/absorção de reativo por meio do inversor de frequência que realiza sua conexão com a rede elétrica.



## 3 Lógica Fuzzy

### 3.1 Introdução

A lógica fuzzy, também conhecida como lógica nebulosa ou difusa, foi introduzido por Lofti Asker Zadeh por volta dos anos de 1960. No qual percebeu que a lógica booleana não era suficiente para representar informações da vida real, que são imprecisas, como por exemplo se fossemos a rua perguntar para as pessoas a partir de qual temperatura elas consideram frio, teríamos respostas diferentes. Logo a lógica Clássica do “0” e “1” ou do “verdadeiro e “falso” não é apropriada em diversas situações (CAVALCANTI et al., 2012).

Neste sentido, a lógica difusa envolve um estudo sobre a importância relativa da precisão, onde o fuzzy pode ser definido como a lógica do raciocínio aproximado ao invés de exato, como por exemplo, o dia esta muito frio, pouco frio, frio, quente, pouco quente e muito quente. A lógica Booleana não consegue descrever a realidade em sua totalidade, apenas com “verdadeiro” ou “falso”, não há meio termo, já a lógica fuzzy é baseada em palavras e não em números, no qual possui facilidade do controle, pois a linguagem aproxima a natural, simplificando soluções de problemas (ZANETTE; RADANOVITSCK; GONÇALVES, 2006).

### 3.2 Conjuntos Fuzzy

Na teoria clássica, os conjuntos são bem definidos, limitados, por exemplo, dado um conjunto  $A$  em um universo  $X$ , os elementos pertencem ou não pertencem ao conjunto, demonstrado na função  $f_A$ :

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases}$$

Segundo Ortega (2001) a lógica fuzzy possui conjuntos que não possuem fronteiras, possuem um certo grau de pertinência aos dois conjuntos, de modo que possa assumir um número infinito de valores entre o o intervalo de  $[0,1]$ . Logo pode-se perceber que através do fuzzy, um único elemento pode admitir graus parciais de pertinência a determinados conjuntos de um universo, diferente do que utilizado na lógica clássica.

Um universo de discurso é um conjunto de valores finitos, no qual contém todos os valores que um elemento pode assumir. Já subconjuntos fuzzy são caracterizado por seu vetor de pertinência (BREMERMANN, 2008).

Os conjuntos fuzzy podem realizar as operações de intersecção de conjuntos ou a união de conjuntos fuzzy, através destes pode-se verificar que as seguintes propriedades algébricas de conjuntos ordinários também valem para conjuntos fuzzy, como:

- Involução;
- Comutatividade;
- Associatividade;
- Distributividade;
- Absorção;
- Lei Transitiva;
- Leis de Morgan.

### 3.3 Variável Linguística

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos fuzzy (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011). Uma variável linguística fuzzy é uma variável no qual é expressada qualitativamente por um termo linguístico, e quantitativamente por uma função de pertinência (ORTEGA, 2001). A temperatura, pressão, etc, pode ser um exemplo de uma variável linguística, que pode assumir valores como baixa, média e alta.

Tanscheit (2012) caracteriza uma variável linguística por uma quintupla, são cinco siglas, representadas por  $(N, T(N), X, G, M)$ , onde:

$N$ : nome da variável

$T(N)$ : conjunto de termos de  $N$ , ou seja, o conjunto de nomes dos valores linguísticos de  $N$

$X$ : universo de discurso

$G$ : regra sintática para gerar os valores de  $N$  como uma composição de termos de  $T(N)$ , conectivos lógicos, modificadores e delimitadores

$M$ : regra semântica, para associar a cada valor gerado por  $G$  um conjunto fuzzy em  $X$ .

De acordo com a Figura 5 pode-se exemplificar a quintupla com a variável temperatura como sendo:

$N$ : temperatura

$T(N)$ : {baixa, média, alta}

$X$ : 0 a 100° C

$G$ : temperatura não baixa e não muito alta, por exemplo

$M$ : associa o valor acima a um conjunto fuzzy cuja função de pertinência exprime o seu significado.

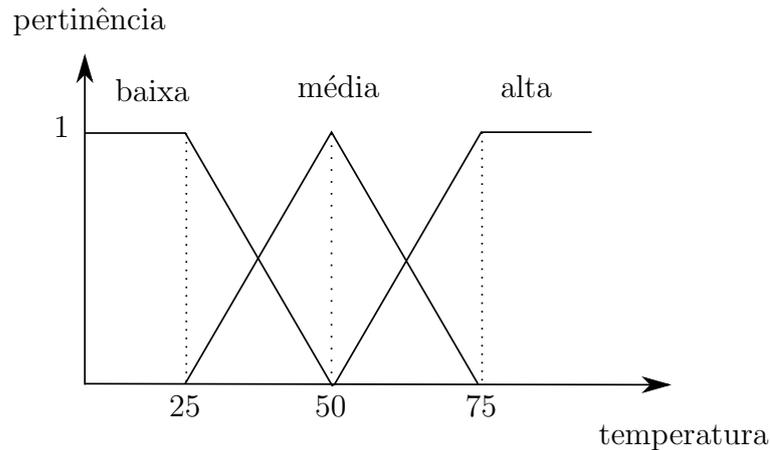


Figura 5 – Variável linguística temperatura.

### 3.4 Funções de Pertinência

A função de pertinência (*membership function* - MF) é uma curva que define a forma como cada ponto no espaço de entrada é mapeado para um valor de adesão (ou grau de pertinência) entre 0 e 1 (TOOLBOX, 1995).

Um exemplo utilizado para demonstrar funções de pertinências, é o conjunto de pessoas altas. No qual "alto" corresponde ao valor 1 e baixo o valor 0, onde existe uma fronteira bem definida na teoria clássica, como demonstra a Figura 6(a). Já a Figura 6(b), demonstra o grau de pertinência de cada indivíduo no conjunto de pessoas altas, no qual o que era classificado como "baixo", torna-se "não tão baixo", assim como anteriormente tinha-se "alto" e na teoria difusa tem-se "definitivamente alto".

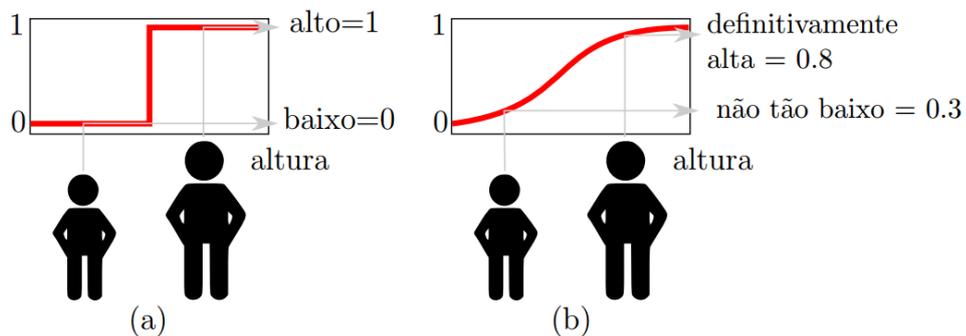


Figura 6 – Função de pertinência na (a) Teoria Clássica (b) Teoria Difusa.

Fonte: Toolbox (1995).

Na lógica difusa, não há um certo valor (fronteira) que a partir deste ponto é considerado outra classificação. Logo a curva que está sendo demonstrada, é chamada de função de pertinência.

As funções de pertinência mais simples são formadas usando linhas retas. A mais simples delas é a função triangular, que possui o nome de função *trimf*. A função de pertinência trapezoidal, conhecida como *trapmf*. A Figura 7 demonstra esses tipos de funções. Por serem funções mais simples, a função de pertinência triangular foi escolhida para realização das simulações.

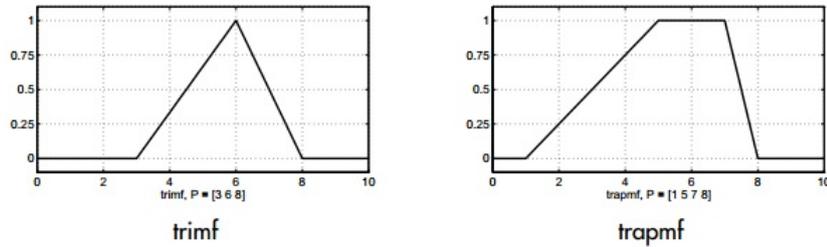


Figura 7 – Função triangular e trapezoidal, respectivamente.

Fonte: Toolbox (1995).

Existem duas funções de pertinência que são construídas através a curva de distribuição de Gauss, a curva de Gauss simples (*gaussmf*) e composição de duas curvas diferentes de Gauss (*gauss2mf*). Tem-se também a função sino, que recebe o nome de *gbellmf*, mostrada na Figura 8.

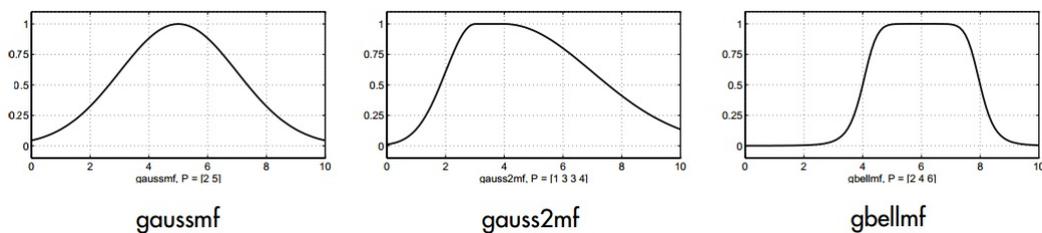


Figura 8 – Função de gauss simples, gauss composta e função sino, respectivamente.

Fonte: Toolbox (1995).

A suavidade das funções gaussianas são incapazes de especificar funções assimétricas, logo existe a função sigmóide, que é dividida em três: função sigmóide simples *sigmf*, a diferenciação entre duas funções sigmóides *dsigmf* e o produto de duas funções sigmóides *psigmf*, as funções podem ser observadas na Figura 9.

Existem ainda, funções polinomiais, a função *zmf* é uma função polinomial assimétrica aberta a esquerda, já a *smf* é aberta a direita, e *pimf* é zerada nos extremos com elevação na parte do meio da curva, apresentadas na Figura 10.

A variedade de funções de pertinências é vasta, pois podem ser modeladas conforme o que o programador precisa, podendo alterar qualquer ponto da função e o estilo da mesma, logo dependem do tipo e da aplicação do problema a ser solucionado, porém

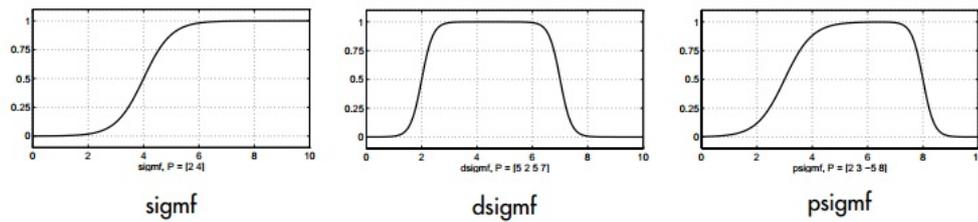


Figura 9 – Função sigmóide simples, a diferenciação e produto de funções sigmóides, respectivamente.

Fonte: Toolbox (1995).

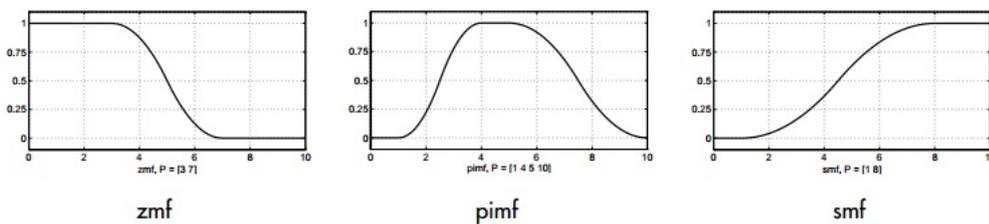


Figura 10 – Função de pertinência polinomial aberta a esquerda, função com elevação centrada e função de pertinência polinomial aberta a direita, respectivamente.

Fonte: Toolbox (1995).

funções de pertinência mais exóticas não são bons sistemas de inferência fuzzy, pois não há uma linearidade, é confuso, logo a resposta pode ser comprometida. Usualmente é utilizado apenas duas, a triangular e a trapezoidal.

## 3.5 Sistema de Inferência

A sistema da lógica fuzzy pode ser dividido em quatro blocos, como mostra na Figura 11.

### 3.5.1 Regras

As regras são em forma de sentenças linguística, que podem ser submetidas através de um especialista. As regras devem seguir um raciocínio dividido em duas partes, o primeiro que é avaliar o antecedente da regra, e por segundo aplicar o resultados no consequente (MARRO et al., 2000).

$$\text{Se } \{X \text{ é antecedentes}(A)\} \text{ Então } \{Y \text{ é consequentes}(B)\}$$

Considerando um universo de discurso onde “A” e “B” são valores linguísticos definidos pelos conjuntos fuzzy. A regra *Se* “X é “A” é chamado o antecedente ou premissa, no qual

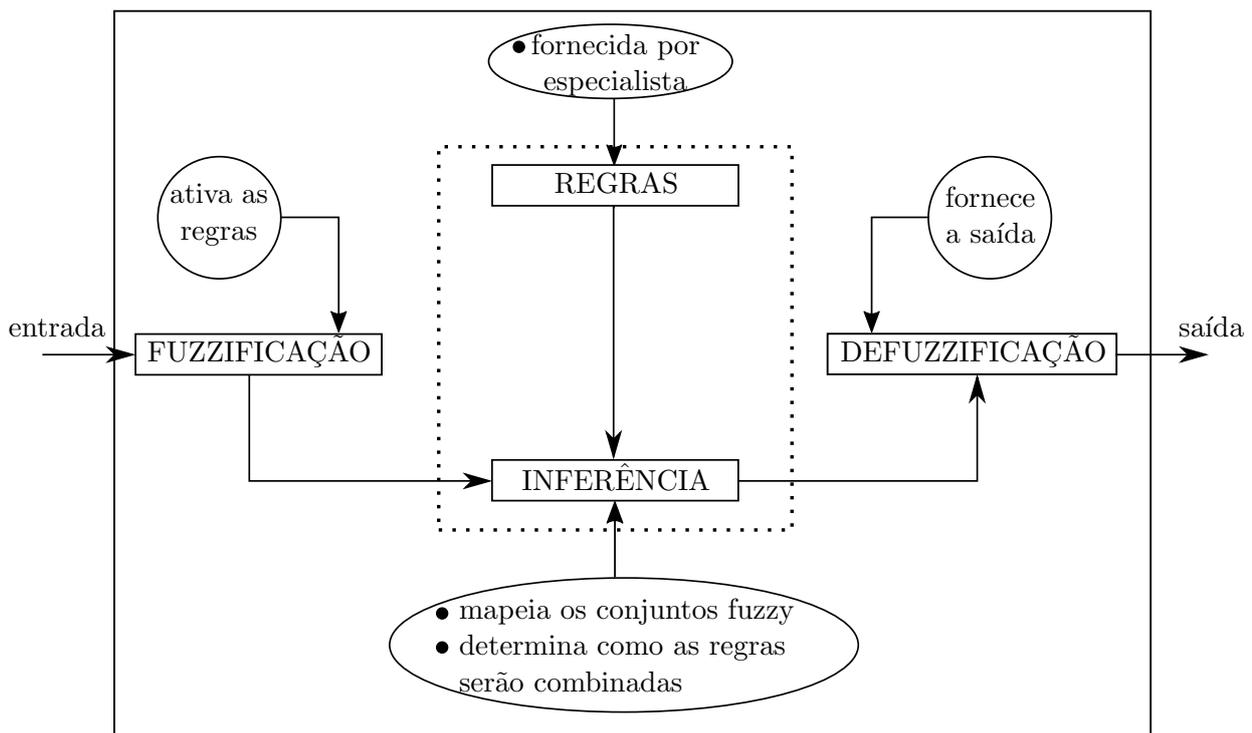


Figura 11 – Blocos de um sistema de inferência fuzzy.

descrevem uma condição, enquanto a parte, *Então* “Y é B” é chamado a consequente ou conclusão. Um exemplo clássico utilizado para demonstrar tal regra, é o exemplo da gorjeta.

*Se* {o serviço é bom} *Então* { a gorjeta é generosa }

Se houver casos em que se tenha vários antecedentes, é preciso encontrar um grau de pertinência resultante de todos os dos antecedentes.

### 3.5.2 Inferência

A inferência fuzzy é um estágio onde ocorre a avaliação de entradas com o propósito de, através das regras e das entradas, conseguir resultados utilizando-se a teoria de conjuntos fuzzy (MARRO et al., 2000).

Existem vários tipos de sistemas de inferência fuzzy que podem ser implementados na lógica: o tipo Mamdani o do tipo Sugeno, entre outros.

O método de inferência fuzzy Mamdani é comumente usado, foi um dos primeiros métodos de sistemas de controle fuzzy. A metodologia foi criada em 1975 por um professor da Universidade de Londres, chamado de Edrahim Mamdani, no qual o uso do método foi a tentativa de controlar uma máquina a vapor, onde se baseou em Lotfi Zadeh.

### 3.5.3 Fuzzyficação

Essa etapa é feito o mapeamento dos números reais para o domínio fuzzy, em outras palavras é etapa que se obtém o grau de pertinência de um espaço de entrada, em um ou mais conjuntos fuzzy.

A Figura 12, demonstra a variável de entrada, *altura*, de um sistema de conjuntos fuzzy do tipo: *baixa*, *média*, *alta*. Percebe-se que a altura 1.78 pertence tanto para o conjunto de altura média como para conjunto de altura alta, porém possui maior grau de pertinência para o conjunto de alta.

A fuzzyficação é um processo que transforma as variáveis linguísticas, de um modo em que o computador entenda, ou seja, transforma termos qualitativos para quantitativos (BREMERMANN, 2008).

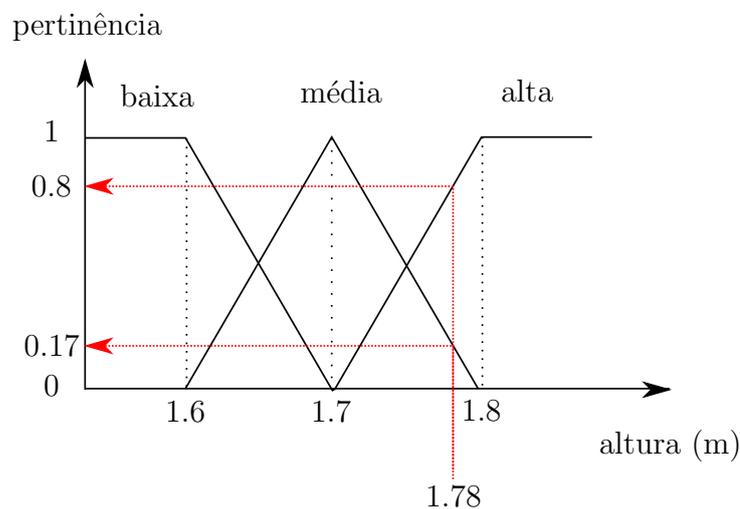


Figura 12 – Conjunto fuzzy para altura.

### 3.5.4 Defuzzyficação

O resultado das regras fuzzy, deve passar pelo processo de defuzzyficação, é nessa etapa que os resultados da regras serão avaliadas e convertidas em valores que atribui à variável de saída um número, ou seja, fornece um valor numérico que significa o que é mais pertinente de “fazer” e com que grau. É uma transformação para ser entendido pela ação de controle (ORTEGA, 2001).

Existem vários métodos de defuzzyficação na literatura, alguns deles são:

- Centro de Área;
- Centro do Máximo;
- Média do Máximo.

Neste trabalho, o método desfuzzyficação utilizado foi centro de área, também conhecido por *centróide* ou *centro* de gravidade ou *centro de massa*, é a técnica mais comumente usada. Esse método baseia-se em encontrar um *centróide* para cada função de saída. As áreas das funções de pertinências são calculadas, a saída é a média ponderada das centróides e as áreas calculadas servindo como peso (BREMERMANN, 2008). A Figura 13 demonstra o processo de desfuzzyficação pelo método centróide. A forma de calcular a saída é apresentada na Equação 3.1

$$z' = \frac{\sum_{i=1}^n z_i C(z_i)}{\sum_{i=1}^n C(z_i)} \quad (3.1)$$

supondo que em um universo de discurso discreto, a saída é  $z'$  é dado pelo centro de gravidade de conjunto obtido pela composição de regras. Onde  $n$  significa o número de quantização da saída,  $z_i$  representa o valor da variável de saída para o intervalo de quantização  $i$  e  $C(z_i)$  o grau de pertinência. Assim calcula-se a média ponderada das regiões.

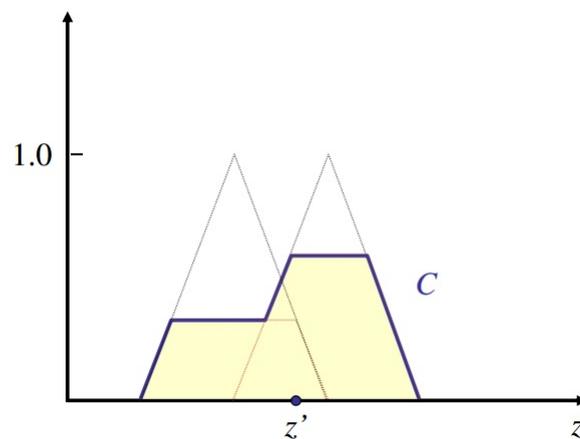


Figura 13 – Processo de Desfuzzyficação pelo método centróide.

Fonte: CAMPELLO, 2011

## 4 Metodologia

### 4.1 Arquitetura Geral

Neste capítulo será abordado a metodologia proposta para o trabalho. A Figura 14 demonstra um fluxograma da arquitetura geral. No início tem-se um modelo de rede teste, que é executado o fluxo de potência para verificação da existência de violação de tensão, se houver é calculado a matriz de efetividade e perdas, logo após esta etapa os controladores fuzzy atuam e através da resposta obtida, modifica o equipamento para fazer a correção de tensão na rede, após é executado o fluxo de potência novamente para verificar se ainda há violação de tensão, se não existir, a tensão da rede esta corrigida, caso ainda exista, é seguido a sequência do fluxograma até que não se tenha mais violações de tensão na rede.

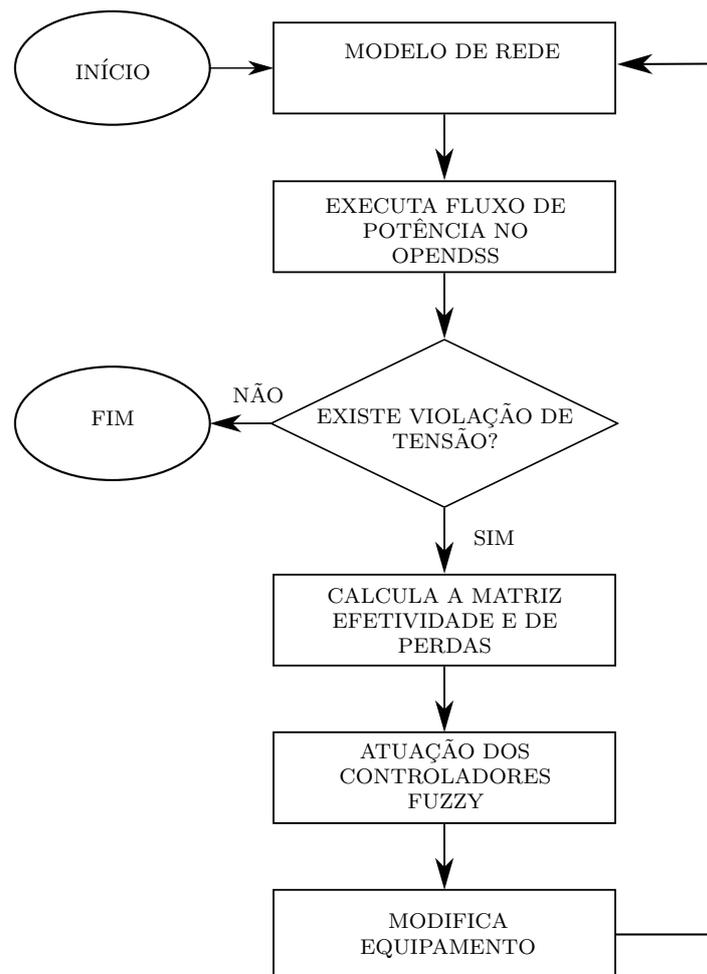


Figura 14 – Estratégia de controle de tensão e potência reativa.

## 4.2 Etapas Controle Volt/VAr

### 4.2.1 Matriz Efetividade

Tendo-se o modelo de rede, simula-se o fluxo de potência do mesmo. Após a execução do fluxo de potência, é verificado se há alguma barra que tenha tensão superior a  $1.05 pu$  ou abaixo de  $0.93 pu$ , se existir essa condição no sistema, afirma-se que houve violação de tensão. A faixa de *não atuação* ou também conhecida por *banda morta* na literatura, é a região onde, os equipamentos de regulação de tensão não irão atuar, caso contrário, passa-se para outra etapa do fluxograma.

O próximo passo a ser feito, é calcular a matriz efetividade, que é uma matriz onde as linhas são as barras do sistema, e as colunas são os equipamentos do sistema que fazem a regulação de tensão. O valor contido em cada célula, é o quão efetivo é um equipamento para dada tal condição do sistema, em uma escala de  $[-1 a 1]$ . Se o menor valor é atribuído a algum equipamento, este representa que o dispositivo é o menos eficiente entre os outros dispostos no sistema para realizar a correção de tensão.

#### 4.2.1.1 Processo de Cálculo

A determinação da matriz de efetividade é realizado em 3 etapas, como demonstrado na Figura 15. O controlador atua de forma iterativa. Para facilitar o entendimento, as etapas que compõem a atuação do controlador são apresentadas na seguinte sequência:

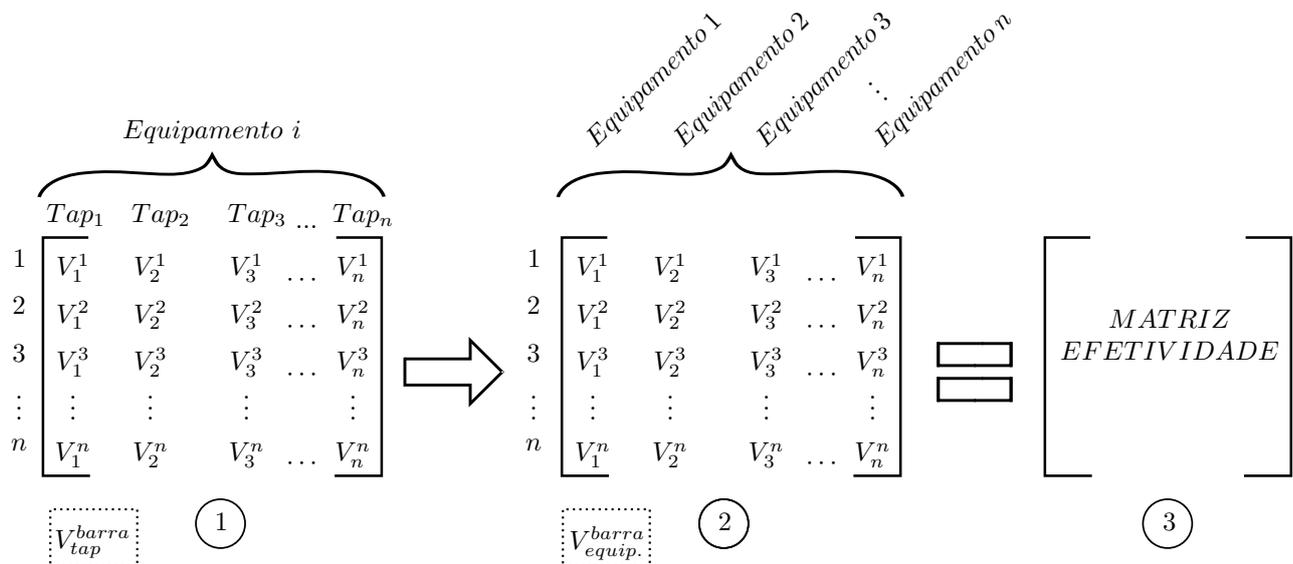


Figura 15 – Diagrama simplificado para obtenção da matriz de efetividade.

1) Etapa 1 e 2: Ajustes nas matrizes

a) Realiza-se o cálculo do fluxo de potência para cada tap disposto pelos equipamentos do sistema e armazenam-se os valores de tensão para cada um dos nós. Após este

procedimento calcula-se o desvio de tensão para cada nó e faz-se a média destes valores.

b) Realiza-se o cálculo dos desvios de tensão a partir do módulo da diferença entre a tensão nominal e a tensão em que o tap se encontra. Divide-se o módulo pelo valor do tap atual.

Um exemplo deste processo de cálculo é demonstrado para um LTC de 32 tap's, considerando o valor por tap de 0,00625 e tap na posição nominal (1,0).

$$desvio_{+1 \text{ tap nominal}} = \frac{|V_{1+0.00625} - V_{1.0}|}{0.00625} \quad (4.1)$$

Repete-se este processo para todos os taps do equipamento analisado.

c) Realiza-se o cálculo da média dos valores encontrados na etapa "b":

$$média = \frac{desvio_{+1 \text{ tap nominal}} + desvio_{+n \text{ tap nominal}}}{n} \quad (4.2)$$

Repete-se este processo para todos os equipamentos de controle existentes no sistema. d) Realiza-se a construção da matriz efetividade, na qual linhas e colunas são representadas por nós e equipamentos, respectivamente.

2) Etapa 4: Ação de controle

A Matriz Efetividade fornece qual equipamento é mais efetivo para a correção de tensão no sistema. Nesta etapa, a matriz final é normalizada no intervalo de [-1 1], pois este valor é uma das entradas do controlador. Para normalizá-la encontra-se um valor intermediário ds valores para cada nó:

$$Valor_{médio} = \frac{Valor_{máx} + Valor_{mín}}{2} \quad (4.3)$$

Onde o denominador será:

$$Denominador = Valor_{máx} - Valor_{médio} \quad (4.4)$$

Por fim o valor normalizado é:

$$Valor_{normalizado} = \frac{Valor_{que \text{ quer normalizar}} - Valor_{médio}}{Denominador} \quad (4.5)$$

Para alcançar o objetivo na definição de qual ação de controle deve ser executada quando existir problema de tensão em um nó do sistema, foram utilizados dois controladores, a partir do Fuzzy Logic Toolbox (1995), através do *software* MATLAB. Cada controlador possui um mapa de nove regras, baseados em Miranda e Calisto (2002). Os controladores foram postos em cascata como mostra a Figura 16.

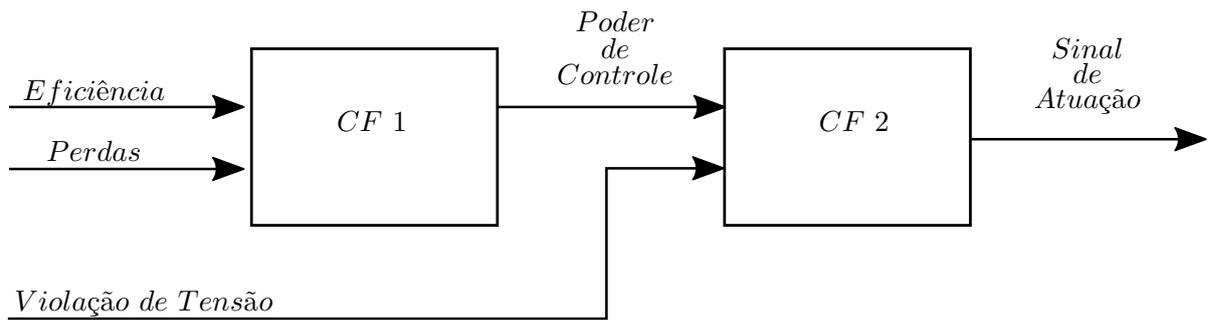


Figura 16 – Cascata dos controladores fuzzy.

#### 4.2.2 Controladores Fuzzy

A primeira variável de entrada do controlador (CF 1) é retirado da matriz de efetividade, o equipamento mais efetivo e o valor de que ele representa normalizado, ou seja na escala  $[-1 \ 1]$ .

A segunda variável de entrada é a as perdas do respectivo equipamento. Como é realizado o fluxo de potência a cada tap do equipamento, é fornecido as perdas do mesmo na rede naquele respectivo tap, é realizado uma média das perdas com todas as fornecidas a cada comutação. Isso é feito para os demais equipamentos, de forma análoga a matriz efetividade, na qual é montada uma matriz com a média das perdas de cada equipamento, e após os valores são normalizados. Como é sabido qual equipamento é o mais eficiente, busca-se nesta matriz de perda o valor respectivo ao equipamento na escala de  $[-1 \ 1]$ , para ser a segunda entrada *perdas* do controlador 1. A montagem da matriz é mostrada na Figura 17.

Bremermann (2008) realiza o controle fuzzy Volt/VAr em sistemas de distribuição, no qual utiliza os controladores de Miranda e Calisto (2002), que possuem as entradas, a matriz efetividade e status ou posição de controle, diferente da metodologia apresentada neste trabalho, que se baseia nos mapas de regras de Miranda e Calisto (2002), porém possui como entrada dos controladores a matriz efetividade e leva em consideração as perdas do sistema para cada comutação realizada por um equipamento da rede.

A tabela 1, demonstra o primeiro mapa de regras do controlador 1 (CF1), baseado em (MIRANDA; CALISTO, 2002). As linhas são a *efetividade* e as colunas *perdas*. O mapa possui três siglas que representam as três funções de pertinência, que significam, negativo (N), zero (ZE) e positivo (P).

Como por exemplo:

Se a *eficiência* é positiva (P) e as *perdas* são positiva (P), então o *poder de controle* é zero

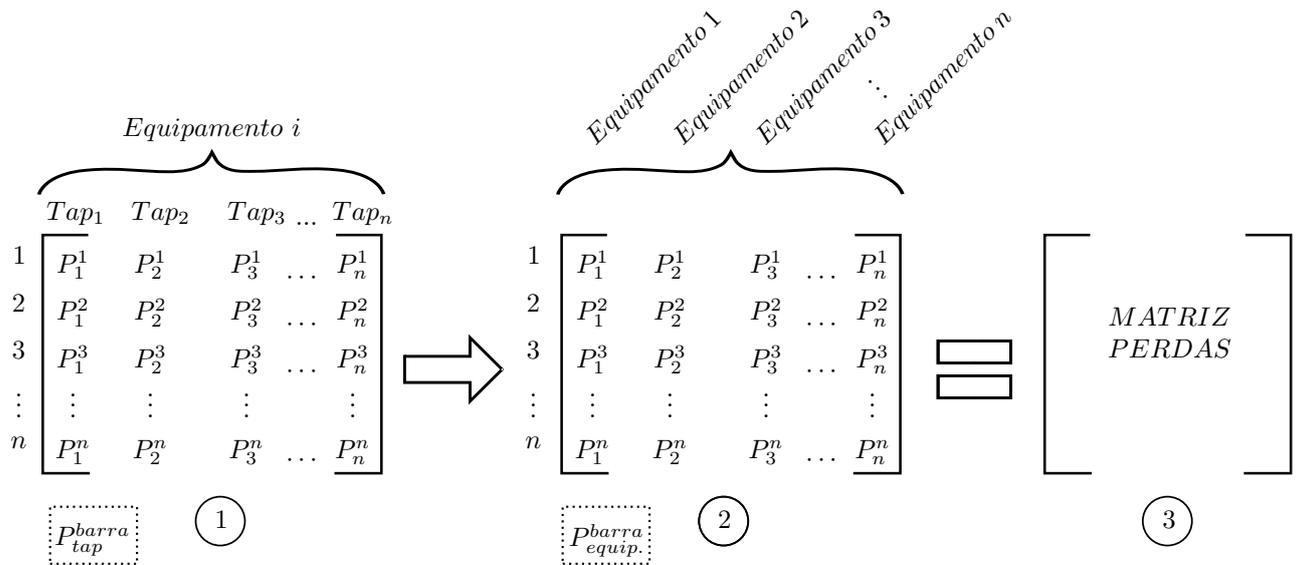


Figura 17 – Diagrama simplificado para obtenção da matriz de perdas.

(ZE).

Tabela 1 – Mapa de Regras do Controlador 1

|            |    | Perdas |    |    |
|------------|----|--------|----|----|
|            |    | N      | ZE | P  |
| Eficiência | N  | ZE     | N  | N  |
|            | ZE | P      | ZE | N  |
|            | P  | P      | P  | ZE |

A Figura 18, demonstra a tela de editor do controlador fuzzy 1 do tipo Mamdani, executado no *software* MATLAB, que tem as entradas, eficiência e perdas, na Figura 18 pode-se ver a escala de  $[-1 \ 1]$ , que o sistema possui duas entradas (*inputs*) e uma saída (*output*) com nove regras, sendo escolhido na defuzzyficação o método da cetróide.

A Figura 19 exhibe como as funções de pertinências foram configuradas, esta sendo demonstrada a variável de saída “poder de controle”, são modeladas de forma triangular como já mencionado anteriormente. A função negativo (N) abrange a escala de  $[-1 \ -0.4]$ , a função zero de  $-0.6$  e estende-se até  $0.6$  e por final a função positivo engloba  $[0.4 \ 1]$ . As funções de pertinências de entradas tiveram a mesma configuração da saída.

O segundo controlador fuzzy (CF 2), possui também duas entradas, a primeira é a saída do controlador fuzzy 1 (CF 1) e a violação de tensão. A entrada violação é o quão sobre o sub tensão esta certa barra, a prioridade de ação, é na barra mais violada do sistema. Assim como o controlador 1 as funções de pertinência adotadas, são as mesmas.

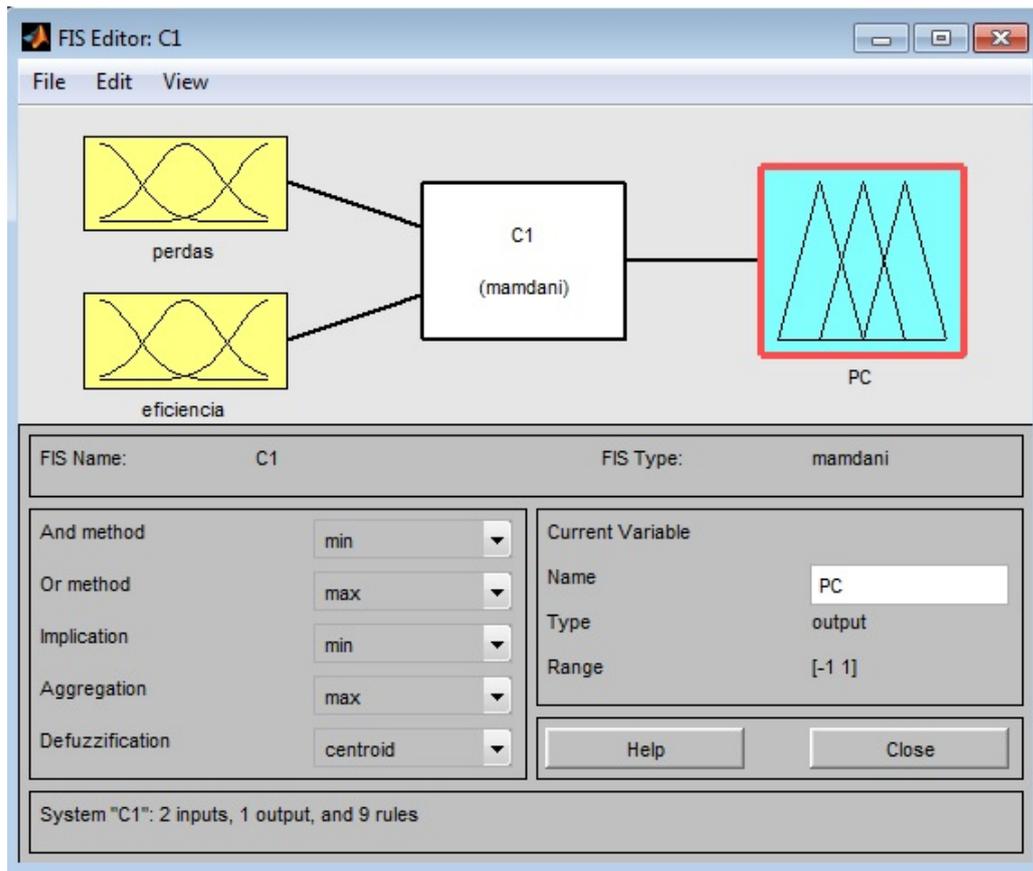


Figura 18 – Editor dos controladores Fuzzy.

O CF2 assim como o controlador 1, possui nove regras, que são demonstradas na Tabela 2, sendo as colunas o *poder de controle*, no qual é a saída do CF1, e a violação de tensão assume as linhas da tabela. Tem-se por exemplo:

Se a *violação de tensão* é positiva (P) e o *poder de controle* é negativa (N), então a *signal de atuação* é negativa (N).

Tabela 2 – Mapa de Regras do Controlador 2

|          |    | Poder de Controle |    |   |
|----------|----|-------------------|----|---|
|          |    | N                 | ZE | P |
| Violação | N  | N                 | N  | P |
|          | ZE | N                 | ZE | P |
|          | P  | ZE                | P  | P |

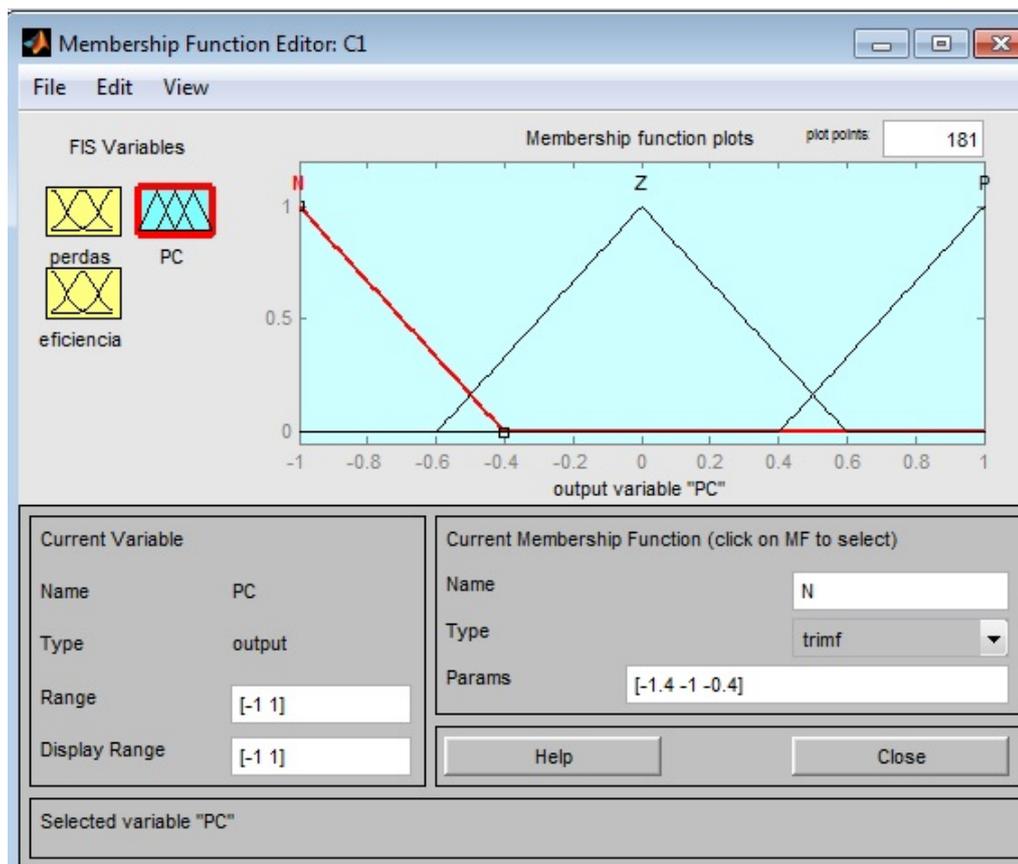


Figura 19 – Funções de pertinência da saída *Poder de Controle*.

### 4.2.3 Ação de Controle

O *signal de atuação* é a saída final do conjunto de controladores, e deve ser executada pelo sistema. Essa solução representa quais os equipamentos e os ajustes de tap mais eficientes para a melhoria e correção das violações de tensão nas barras, valor da saída é convertido para um valor de tap do equipamento mais eficiente e assim modificado no sistema.

Após a normalização para a faixa de “não atuação”, é calculado novamente o fluxo de potência, e a próxima barra mais violada será tomada como prioridade de solução, seguindo assim sucessivamente até não haver mais nós fora da faixa de  $0.93 pu$  até  $1.05 pu$ .

Em um sistema real completo como demonstrado na Figura 20, o modelo de rede, que é simulado em um *software*, fornece o fluxo de potência, e através desse, os controladores fuzzy atuam, para encontrar a melhor solução para o sistema.

Tendo-se a melhor escolha de equipamento e tap, no qual é o valor do *signal de atuação*, o sistema envia para o SCADA (Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados), que faz a comunicação com os equipamentos do sistema real, informando qual é a melhor posição de controle a ser tomada.

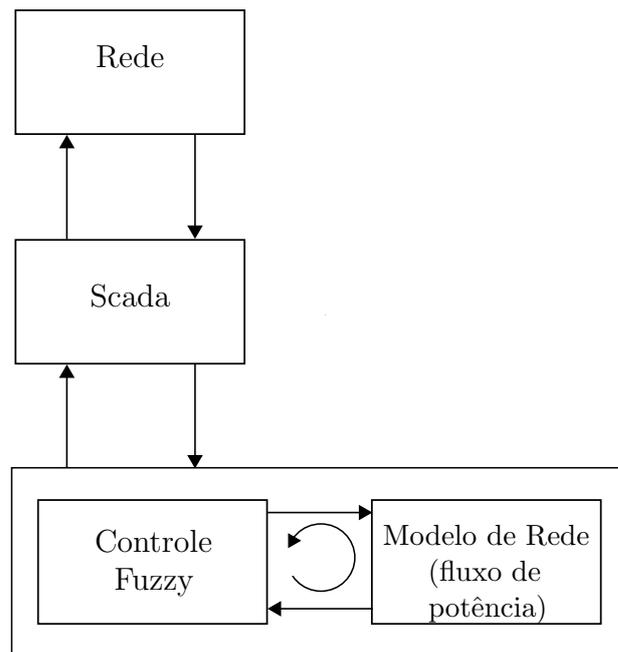


Figura 20 – Modelo completo com a utilização de controladores fuzzy em um sistema real.

Salienta-se que este trabalho não aborda interface SCADA em tempo real, o modelo de rede é atualizado em função da curva de carga horária.

## 5 Resultados

### 5.1 Rede Teste 34 barras

As simulações foram realizadas na rede teste IEEE 34 barras, como mostra a Figura 21. Foi utilizado o *software* OpenDss, que é um programa para simulação de redes de distribuição, em conjunto do MATLAB, para a realização do controle Volt/VAr. A rede é de grande extensão, aproximadamente 150 km. A rede originalmente conta com cinco equipamentos no sistema, no qual foram incluso três geradores localizados no nós 840, 890 e 844.

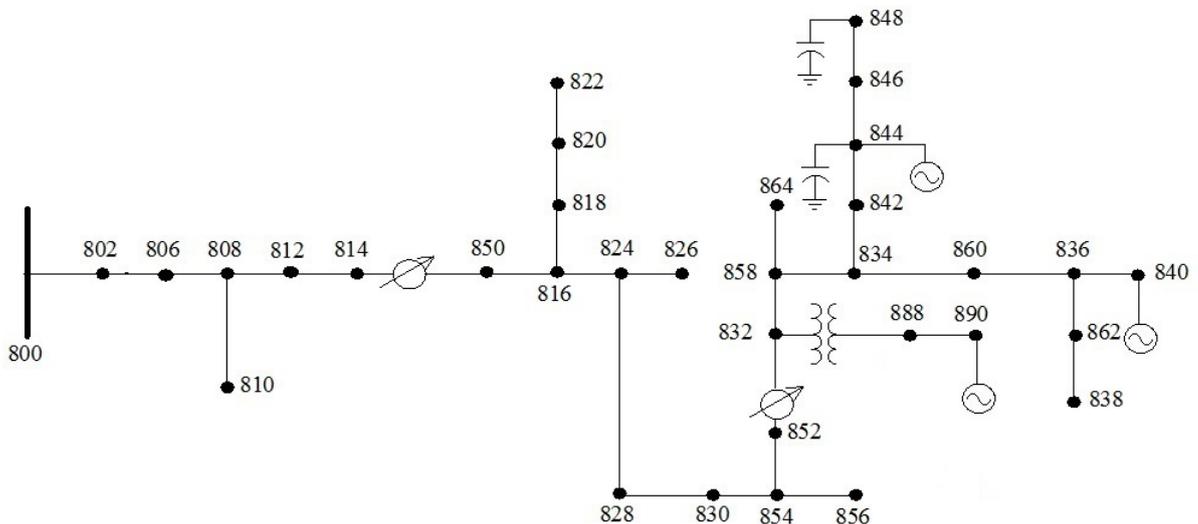


Figura 21 – Rede teste IEEE 34 barras.

Para as simulações, foram utilizados os equipamentos de controle: banco de capacitores, reguladores de tensão e a geração distribuída. Os transformadores de distribuição não foram usados, pois como a mudança de tap do equipamento fica na parte interna, submersa no óleo, no qual é necessário fazer o desligamento do trecho onde se encontra, pois a mudança de posição é realizada com o transformador desligado, além do mais que é preciso deslocar uma equipe para realizar tal atividade.

#### 5.1.1 Dados Elétricos

A Tabela 3 mostra a localização dos equipamentos utilizados no controle Volt/VAr, e a forma como foram modelados. A Tabela 4 mostra as distâncias entre um nó e outro do sistema IEEE 34 barras. A Tabela apresenta 5 as cargas distribuídas da rede, foram atribuídas curvas típicas as cargas.

Tabela 3 – Características dos Equipamentos utilizados no controle Volt/VAr

| Equipamento                    | Localização                    | Faixa de Ajuste             | Passo            |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------|
| <b>Reguladores de Tensão</b>   | Entre os nós 814-850 e 852-832 | 32 taps (+ 16 -16 posições) | 0,00625 pu       |
| <b>Banco de Capacitores</b>    | Nós 844 e 848                  | 0-450 kVAr                  | 150 kVAr         |
| <b>Geração Distribuída (P)</b> | Nós 840, 844 e 890             | 0-300 kW                    | Variação horária |
| <b>Geração Distribuída (Q)</b> | Nós 840, 844 e 890             | 0-300 kVAr                  | 10 kVAr          |

Tabela 4 – Comprimentos das linhas da rede IEEE 34 barras

| Nó A | Nó B | Comprimento (km) |
|------|------|------------------|
| 800  | 802  | 2,58             |
| 802  | 806  | 1,73             |
| 806  | 808  | 32,23            |
| 808  | 810  | 5,80             |
| 808  | 812  | 37,5             |
| 812  | 814  | 29,7             |
| 814  | 850  | 0,01             |
| 816  | 818  | 1,71             |
| 816  | 824  | 10,21            |
| 818  | 820  | 48,15            |
| 820  | 822  | 13,74            |
| 824  | 826  | 3,03             |
| 824  | 828  | 0,84             |
| 828  | 830  | 20,4             |
| 830  | 854  | 0,52             |
| 832  | 888  | 4,9              |
| 834  | 860  | 2,02             |
| 834  | 842  | 0,28             |
| 836  | 840  | 0,86             |
| 836  | 862  | 0,28             |
| 842  | 844  | 1,35             |
| 844  | 846  | 3,64             |
| 846  | 848  | 0,53             |
| 850  | 816  | 0,31             |
| 852  | 832  | 0,01             |
| 854  | 856  | 23,33            |
| 854  | 852  | 36,83            |
| 858  | 864  | 1,62             |
| 858  | 834  | 5,83             |
| 860  | 836  | 2,68             |
| 862  | 838  | 4,86             |
| 888  | 890  | 10,56            |

Tabela 5 – Carga Distribuída

| Nó A | Nó B | kV     | Fase A |       | Fase B |       | Fase C |       | Curva de Carga |
|------|------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|----------------|
|      |      |        | kW     | kVAr  | kW     | kVAr  | kW     | kVAr  |                |
| 802  | 806  | 14.376 |        |       | 112.0  | 45.0  | 112.0  | 45.0  | Industrial     |
| 808  | 810  | 14.376 |        |       | 45.0   | 10.0  |        |       | Residencial    |
| 818  | 820  | 14.376 | 112.0  | 45.0  |        |       |        |       | Industrial     |
| 820  | 822  | 14.376 | 45.0   | 10.0  |        |       |        |       | Residencial    |
| 816  | 824  | 24.9   |        |       | 45.0   | 10.0  |        |       | Residencial    |
| 824  | 826  | 14.376 |        |       | 75.0   | 25.0  |        |       | Industrial     |
| 824  | 828  | 14.376 |        |       |        |       | 75.0   | 25.0  | Industrial     |
| 828  | 830  | 14.376 | 45.0   | 10.0  |        |       |        |       | Residencial    |
| 854  | 856  | 14.376 |        |       | 45.0   | 10.0  |        |       | Residencial    |
| 832  | 858  | 24.9   | 75.0   | 25.0  | 75.0   | 25.0  | 75.0   | 25.0  | Industrial     |
| 858  | 864  | 14.376 | 45.0   | 10.0  |        |       |        |       | Residencial    |
| 858  | 834  | 24.9   | 45.0   | 10.0  | 45.0   | 10.0  | 45.0   | 10.0  | Residencial    |
| 834  | 860  | 24.9   | 112.0  | 45.0  | 112.0  | 45.0  | 112.0  | 45.0  | Industrial     |
| 860  | 836  | 24.9   | 45.0   | 10.0  | 45.0   | 10.0  | 45.0   | 10.0  | Residencial    |
| 836  | 840  | 24.9   | 45.0   | 10.0  | 45.0   | 10.0  |        |       | Residencial    |
| 862  | 838  | 14.376 |        |       | 45.0   | 10.0  |        |       | Residencial    |
| 842  | 844  | 14.376 | 45.0   | 10.0  |        |       |        |       | Residencial    |
| 844  | 846  | 14.376 |        |       | 75.0   | 30.0  | 75.0   | 30.0  | Industrial     |
| 846  | 848  | 14.376 |        |       | 45.0   | 30.0  |        |       | Residencial    |
| 860  |      | 24.9   | 60.0   | 48.0  | 60.0   | 48.0  | 60.0   | 48.0  | Industrial     |
| 840  |      | 24.9   | 27.0   | 21.0  | 27.0   | 21.0  | 27.0   | 21.0  | Industrial     |
| 848  |      | 24.9   | 60.0   | 48.0  | 60.0   | 48.0  | 60.0   | 48.0  | Industrial     |
| 830  |      | 24.9   | 10.0   | 5.0   | 10.0   | 5.0   | 10.0   | 5.0   | Industrial     |
| 890  |      | 4.160  | 450.0  | 225.0 | 450.0  | 225.0 | 450.0  | 225.0 | Industrial     |

## 5.2 Curva de Cargas

A Figura 22 e 23 demonstram a curva de carga da subestação nas 24 horas, na potência ativa e reativa respectivamente, onde apresenta picos nos horários 11,15 e 21 horas, e vales nos horários 6,13 e 19 horas. A curva mais acima demonstra a fase A, as duas abaixo são as fases B e C respectivamente. As curvas de cargas das Figuras 24 e 25 apresentam as curvas de cargas residencial e industrial, respectivamente.

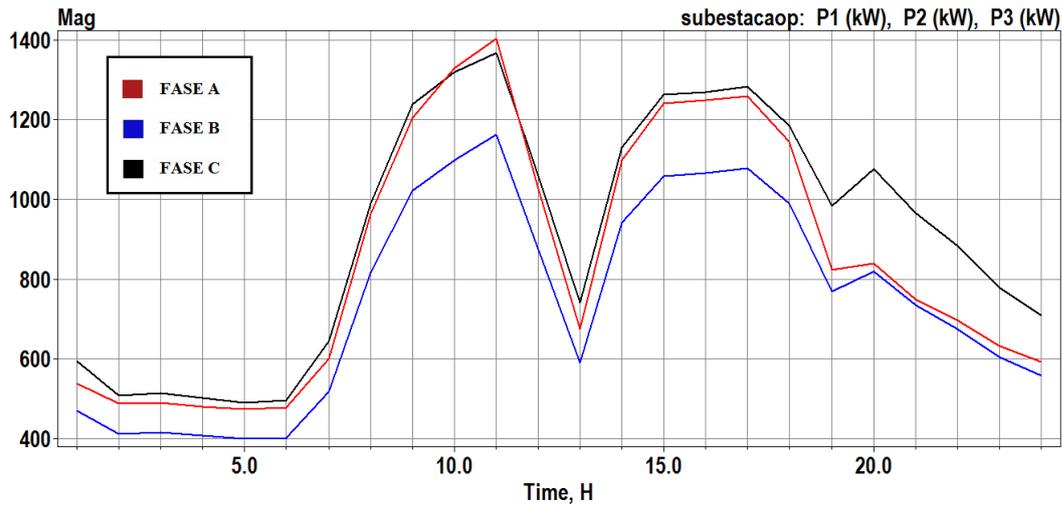


Figura 22 – Curvas de carga da subestação de potência ativa.

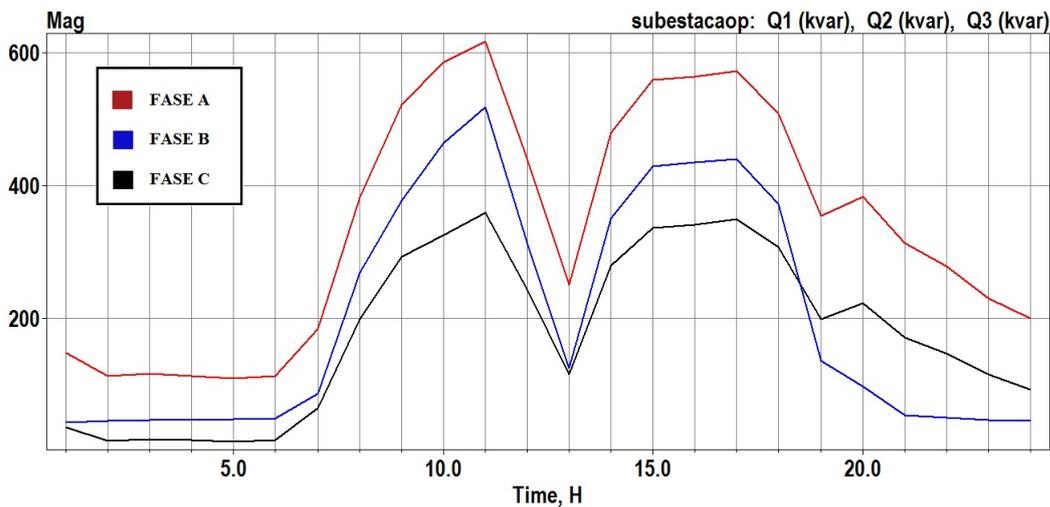


Figura 23 – Curvas de carga da subestação de potência reativa.

## 5.3 Resultados de Simulação

Foram realizados três testes distintos, considerando apenas a efetividade, perdas e uma combinação entre efetividade e perdas. Que tem por objetivo analisar a atuação dos controladores fuzzy, em diferentes situações, foram observadas as tensões nas barras que estão situadas as gerações distribuída, e os nós que sofrem as piores violações de tensão.

### 5.3.1 Controle por Efetividade

Para o teste da efetividade, foi considerado que a efetividade fosse a principal entrada, tendo como objetivo fazer a correção de tensão, apenas com a efetividade dos equipamentos, sem visar as perdas geradas. A Tabela 6, demonstra a atuação dos equipamentos, nas 24 horas de um dia.

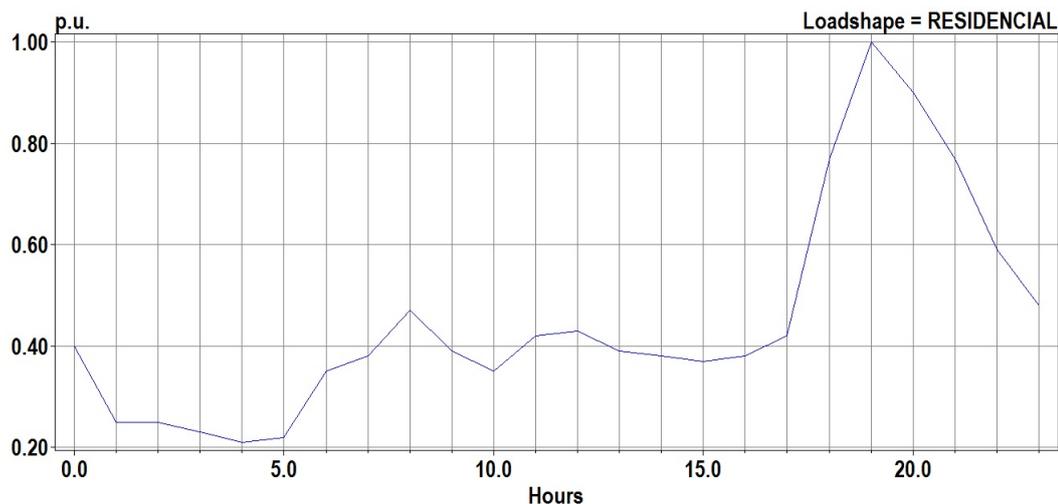


Figura 24 – Curva de carga residencial.

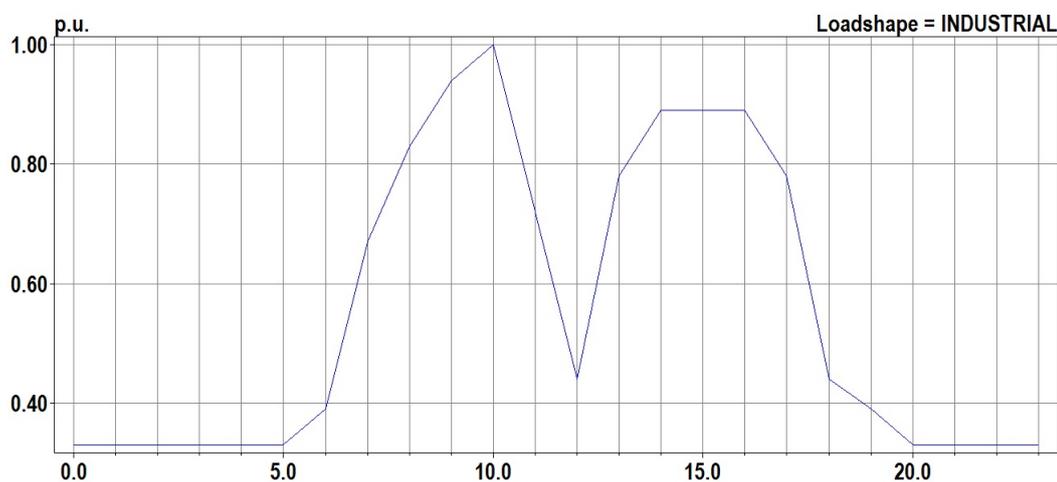


Figura 25 – Curva de carga industrial.

Pode-se observar que no primeiro horário já existe violação de tensão na barra 838 na qual é a mais distante desde o alimentador, pois há uma queda natural da tensão proporcional a sua distância, no qual é corrigida pelo regulador 1. No horário das 4:00 hrs houve um afundamento de tensão, tendo como pior violação 0.79 pu. Nesse horário, o equipamento mais efetivo foi o regulador 2, porém com seu tap máximo, ainda não foi suficiente para elevar os níveis no limite estabelecido, logo passou para o próximo equipamento mais efetivo, que foi o gerador 2, que está situado na barra 890, porém os níveis de tensão se mantiveram até as 6:00 hrs, que precisou do auxílio do gerador 1, para equalização das tensões.

As 10:00 hrs e ao meio-dia, ocorreu sobretensão na barra 890, chegando a níveis de até 1.08 pu, que foram corrigidos com a saída do gerador 1 e gerador 2 respectivamente. Essa configuração foi efetiva até as 16:00 e 17:00 hrs, onde as barras 890 e 838, atinge níveis de tensão de 0.82 pu e 0.86 pu, respectivamente, que foram corrigidas pelo uso

Tabela 6 – Comportamento dos Equipamentos através do Controle por Efetividade

| Hora | Pior Barra                   | Tensão (pu) | Reg. 1 (tap) | Reg. 2 (tap) | Cap. 1 (kVAr) | Cap. 2 (kVAr) | Ger. 1 (kVAr) | Ger. 2 (kVAr) | Ger. 3 (kVAr) |
|------|------------------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0    | -                            | -           | 0            | 0            | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             |
| 1    | 838                          | 0.9         | +6           | 0            | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             |
| 2    | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 3    |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 4    | 890                          | 0.79        | +6           | +16          | 0             | 0             | 0             | 260           | 0             |
| 5    | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 6    | 838                          | 0.9         | +6           | +16          | 0             | 0             | 280           | 300           | 0             |
| 7    | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 8    |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 9    |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 10   | 890                          | 1.08        | +6           | +11          | 0             | 0             | 0             | 300           | 0             |
| 11   | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 12   | 890                          | 1.07        | 0            | +16          | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             |
| 13   | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 14   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 15   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 16   | 890                          | 0.82        | 0            | +16          | 0             | 0             | 280           | 300           | 0             |
| 17   | 838                          | 0.86        | +13          | +16          | 0             | 0             | 300           | 300           | 0             |
| 18   | 890                          | 1.06        | +13          | +11          | 0             | 0             | 300           | 300           | 0             |
| 19   | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 20   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 21   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 22   | 890                          | 1.08        | 0            | +11          | 0             | 0             | 300           | 300           | 0             |
| 23   | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 24   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |

dos geradores 1 e 2 e também pelo regulador de tensão 2, porém o novo arranjo dos equipamentos, causou sobretensão na barra 890 novamente, no horário das 18:00 hrs, no qual após a correção os níveis de tensão se mantiveram até as 22:00 hrs, que ocorreu sobretensão na mesma barra, que foi corrigida com o tap neutro do regulador 1.

A Figura 26 demonstra os níveis de tensão da barra 838 nas 24 horas, essa barra foi a que mais sofreu violação por causa de sua distância em relação ao alimentador, houve então a violação de tensão nessa barra nos horários 1:00, 4:00, 5:00, 16:00 e 17:00 hrs. As barras azuis são as tensões antes do controlador atuar, e as amarelas são após a correção.

Existem horários que não haveriam a necessidade da normalização de tensão, como por exemplo no horário das 18:00 e 22:00 hrs, pois a barra se encontra dentro dos limites estabelecidos, porém ocorreu violação de tensão em outras barras do sistema, que acarretaram a atuação dos controladores, modificando os níveis de tensão da barra.

Os níveis de tensão da barra 840, podem ser observados na Figura 27, essa barra

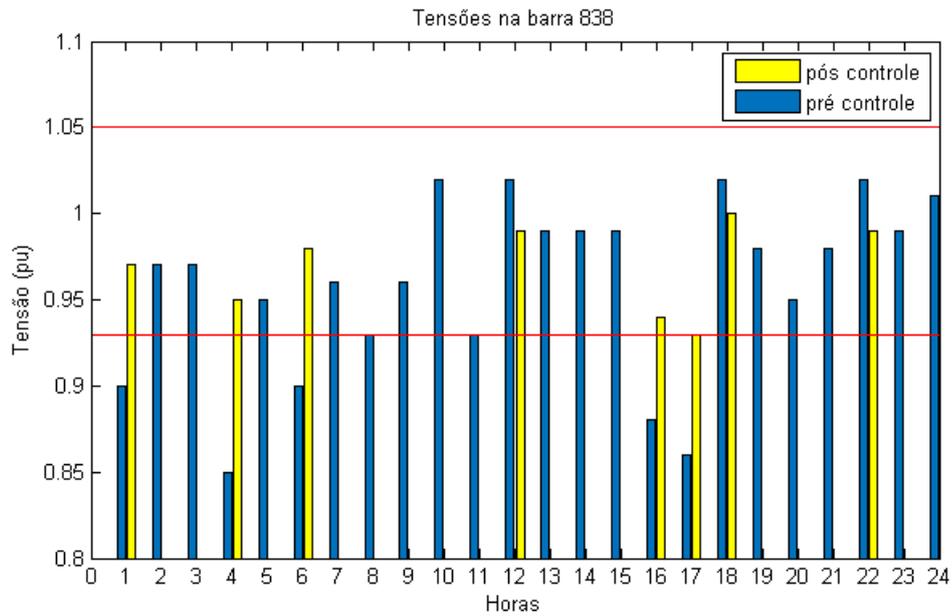


Figura 26 – Tensões nas 24 horas na barra 838 através do controle por efetividade.

é onde está o primeiro gerador instalado, ocorreu violação de tensão nessa barra nos horários 4:00, 16:00 e 17:00 hrs. Como mencionado anteriormente, a atuação em horários não necessários para essa barra, foi devido a violação em outra barra do sistema.

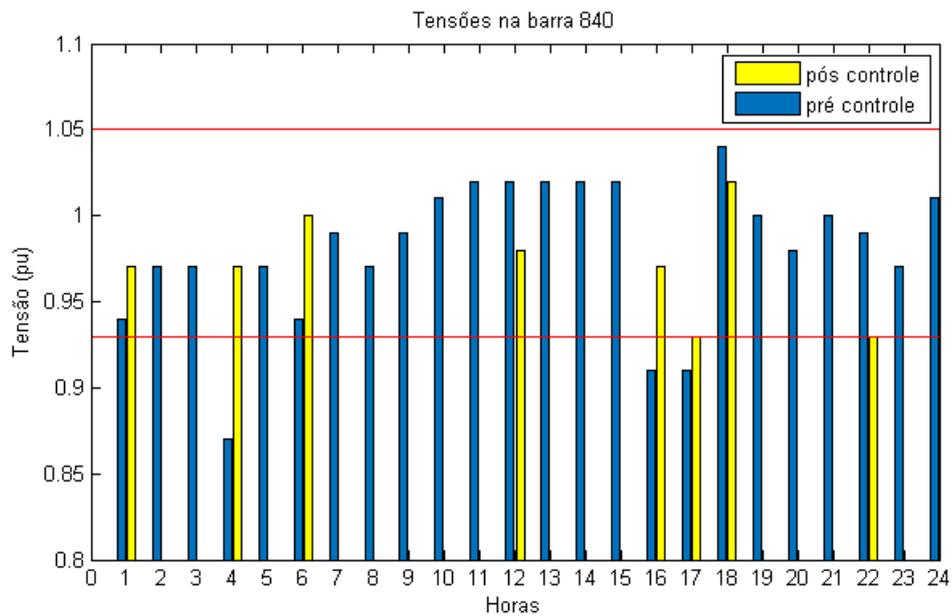


Figura 27 – Tensões nas 24 horas na barra 840 através do controle por efetividade.

A Figura 28 demonstra os níveis de tensão da barra 848 em cada hora do dia, nesta barra há o segundo gerador instalado, ocorreu sobretensão nessa barra nos horários 10:00, 12:00, 18:00 e 22:00 hrs, essa violação foi dada na configuração de possuir um

gerador instalado no nó e ainda há um regulador de tensão próximo, no que acarretou esta sobretensão.

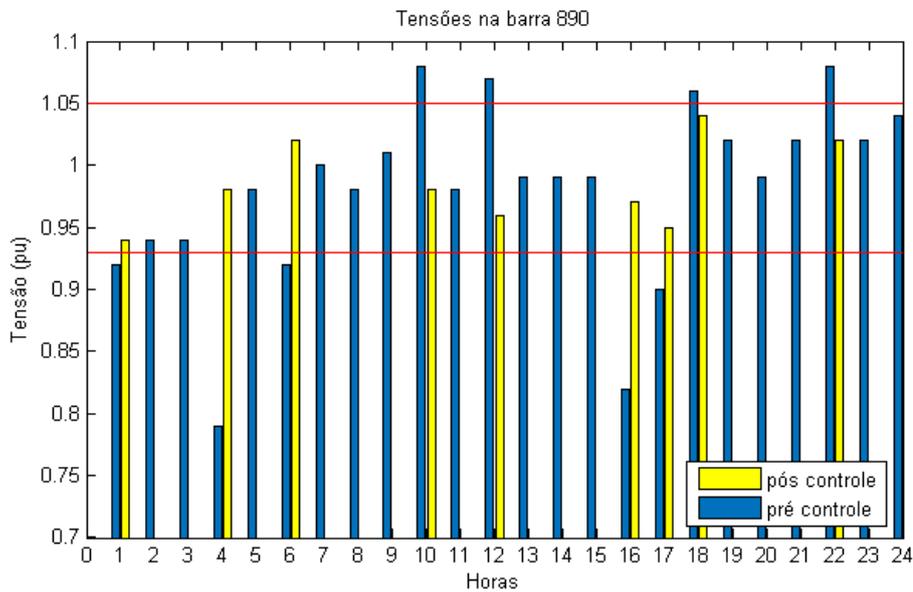


Figura 28 – Tensões nas 24 horas na barra 890 através do controle por efetividade.

A Figura 29 demonstra os níveis de tensão da barra 844, no qual é onde esta o terceiro gerador instalado, ocorreu violação de tensão nessa barra nos horários 4:00, 16:00 e 17:00 hrs, mesmo sendo um barra violada, a pior violação ocorrida, nesse horário foi da barra 838, como o nível global de tensão estava abaixo da “banda morta”, logo corrigindo a pior violação do sistema, por consequência corrigiu a tensão no nó 844.

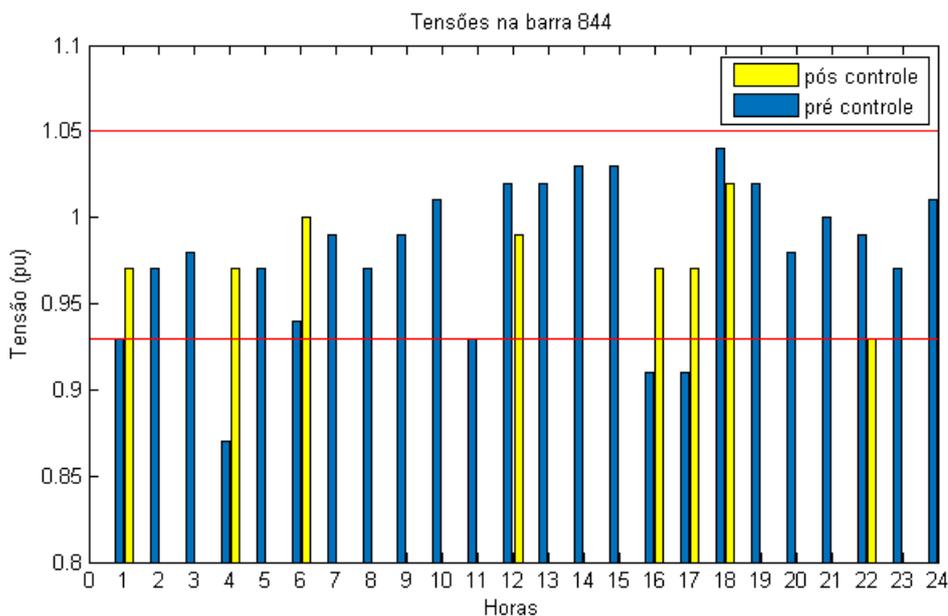


Figura 29 – Tensões nas 24 horas na barra 844 através do controle por efetividade.

A Figura 30 demonstra a curva de potência reativa resultante através do controle por efetividade. Em comparação a curva de potência reativa da subestação pode-se notar que através da injeção de reativo na rede ocorreu a diminuição da carga reativa da subestação.

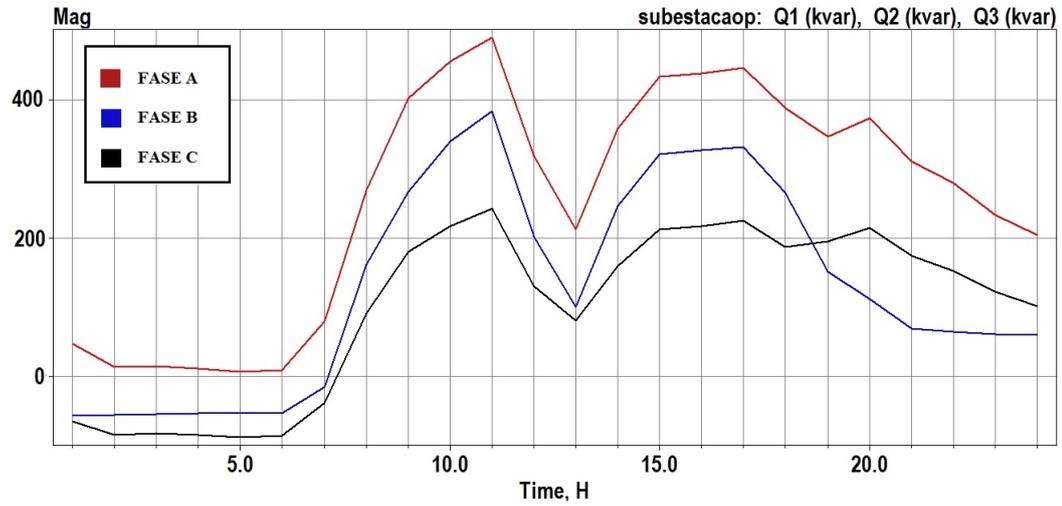


Figura 30 – Curvas de potência reativa final através do controle por efetividade.

### 5.3.2 Controle por Perdas

Para o teste de perdas, foi considerado que as perdas fossem a principal entrada dos controladores fuzzy, tendo como propósito realizar a correção de tensão, apenas com os equipamentos que tivessem as menores perdas, sem levar em consideração a efetividade dos equipamentos para realizar o controle Volt/VAr. A Tabela 7, demonstra o comportamento dos equipamentos, nas 24 horas de um dia.

Tabela 7 – Comportamento dos Equipamentos através do Controle por Perdas

| Hora | Pior Barra                   | Tensão (pu) | Reg. 1 (tap) | Reg. 2 (tap) | Cap. 1 (kVAr) | Cap. 2 (kVAr) | Ger. 1 (kVAr) | Ger. 2 (kVAr) | Ger. 3 (kVAr) |
|------|------------------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0    | -                            | -           | 0            | 0            | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             |
| 1    | 838                          | 0.9         | 0            | 0            | 0             | 0             | 0             | 0             | 90            |
| 2    | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 3    |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 4    | 890                          | 0.79        | 0            | 0            | 450           | 450           | 280           | 300           | 300           |
| 5    | 838                          | 0.89        | 0            | +15          | 450           | 450           | 300           | 300           | 300           |
| 6    | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 7    |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 8    |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 9    |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 10   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 11   | 890                          | 1.07        | 0            | 0            | 450           | 450           | 280           | 300           | 300           |
| 12   | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 13   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 14   | 890                          | 1.07        | 0            | 0            | 0             | 0             | 280           | 300           | 300           |
| 15   | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 16   | 838                          | 0.9         | 0            | 0            | 450           | 450           | 280           | 300           | 300           |
| 17   | 838                          | 0.86        | 0            | +16          | 450           | 450           | 280           | 300           | 300           |
| 18   | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 19   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 20   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 21   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 22   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 23   | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 24   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |

Assim como no teste da efetividade, ocorreu violação no primeiro horário, na barra 838, que foi corrigida com a atuação do gerador 3. A próxima violação ocorreu no horário das 04:00 hrs, no qual o equipamento que obteve menores perdas foram os geradores, porém eles não foram o suficiente para elevar a tensão em níveis adequados, logo utilizou o próximo equipamento com menores perdas, que foram os capacitores. Porém já no horário das 05:00 hrs, precisou do auxílio do regulador de tensão 2, no tap 15.

As 11:00 hrs ocorreu sobretensão na barra 890, devido a configuração estabelecida

anteriormente, como o regulador apresentava maiores perdas aos demais equipamentos já atuando, logo o mesmo escolhido para voltar ao neutro, para voltar aos níveis normais de tensão do sistema. Conforme a disposição dos equipamentos, verificou-se sobretensão novamente na barra 890 no horário das 14:00 hrs, que com a saída dos capacitores da rede, os níveis de tensão equalizaram.

No horário das 16:00 hrs, os capacitores voltam a atuar, e as 17:00 hrs, volta também o regulador de tensão 2, com seu tap máximo, para conseguir normalizar os níveis de tensão. Somente as 22:00 hrs que precisou fazer alteração na rede, que ocorreu sobretensão novamente na barra 890, onde o regulador de tensão volta para seu tap neutro.

A Figura 31 demonstra os níveis de tensão da barra 838 nas 24 horas, assim como nos testes com a efetividade, essa barra também foi a que mais apresentou violações de tensão, isso ocorreu pela queda de tensão natural que acontece ao longo da linha por causa de sua distância em relação ao alimentador, comparada as outras, apresenta maior distância, logo há maior queda de tensão neste trecho. As violações de tensão nessa barra ocorreu nos horários 1:00, 4:00, 5:00, 16:00 e 17:00 hrs.

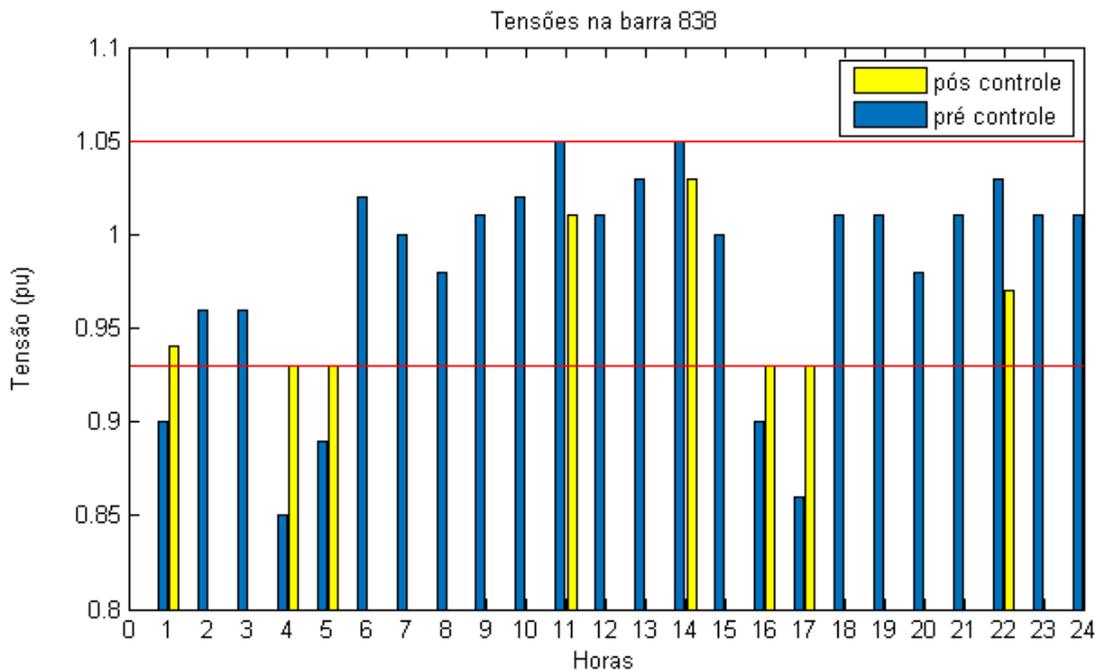


Figura 31 – Tensões nas 24 horas na barra 838 através do controle por perdas.

Os níveis de tensão da barra 840 são apresentados na Figura 32. Ocorreu violação de tensão nessa barra nos horários 4:00, 5:00, 16:00 e 17:00 hrs. A atuação dos controladores no horário das 11:00, 14:00 e 22:00, foi devido a sobretensão em outra barra do sistema, no qual quando corrigido, baixou os níveis de tensão global do sistema.

Na Figura 33, pode-se observar os níveis de tensão da barra 890 em cada hora do

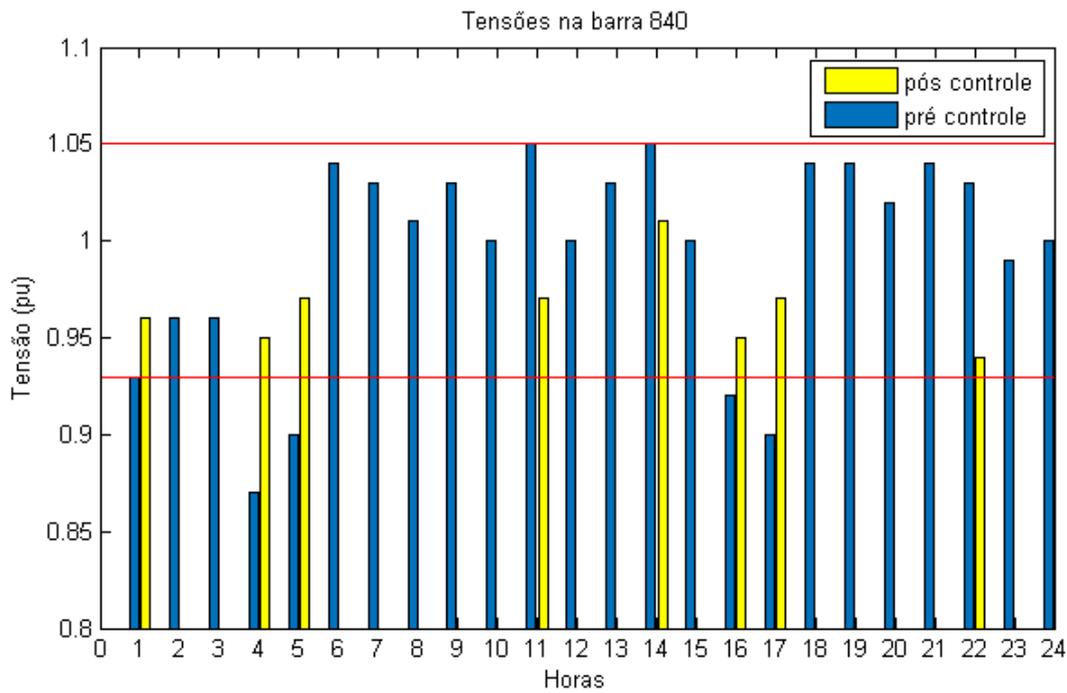


Figura 32 – Tensões nas 24 horas na barra 840 através do controle por perdas.

dia, devido ao seu arranjo na rede, ocorreu problema de subtensão, nos horários 1:00, 5:00, 16:00 e 17:00 hrs, e de sobretensão nos horários 11:00 e 14:00 hrs.

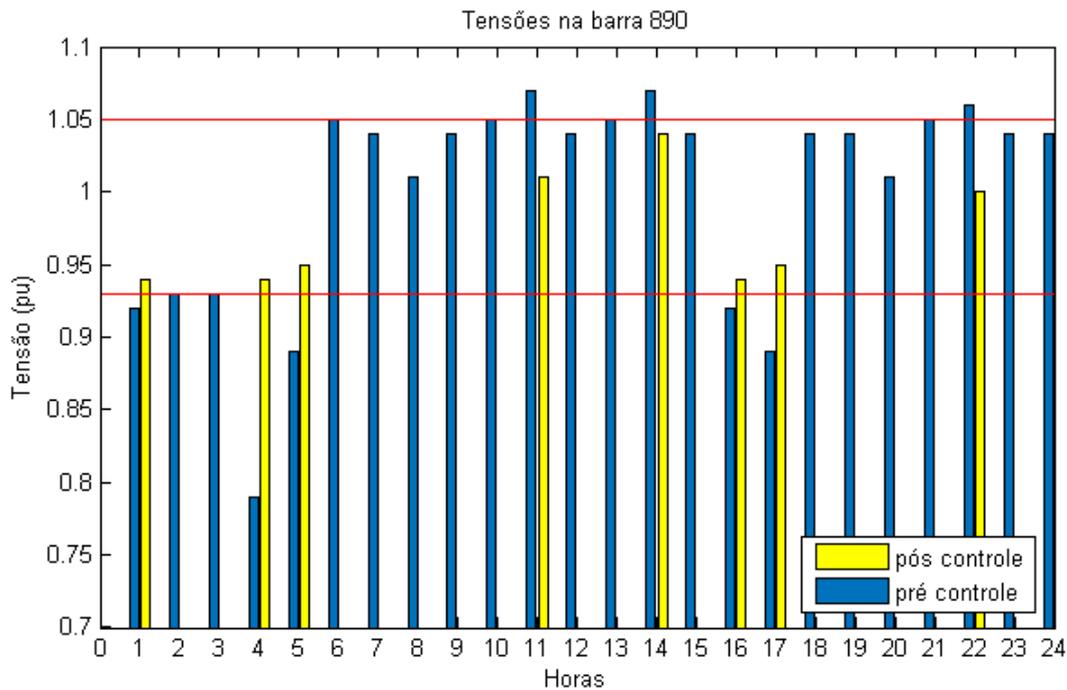


Figura 33 – Tensões nas 24 horas na barra 890 através do controle por perdas.

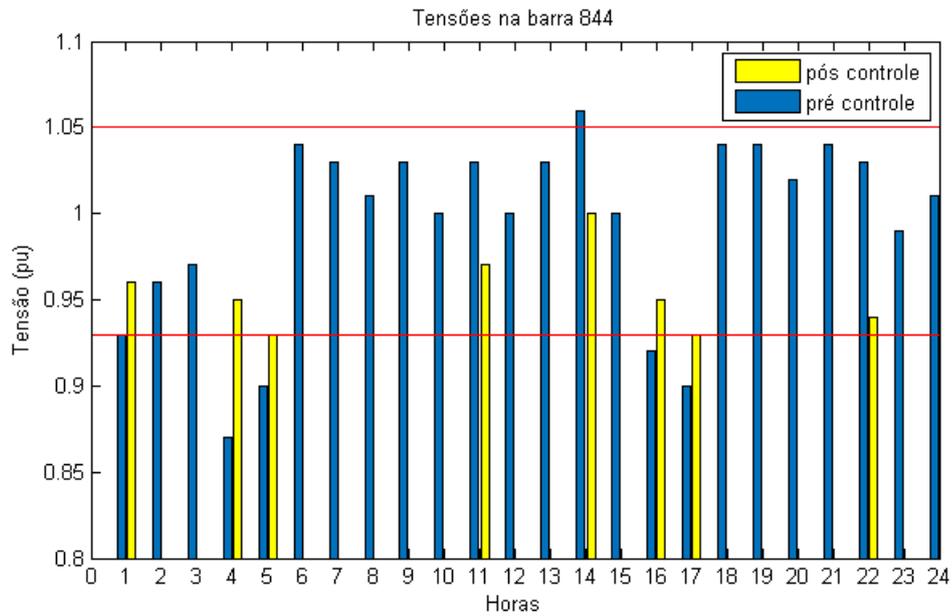


Figura 34 – Tensões nas 24 horas na barra 844 através do controle por perdas.

As tensões nas 24 horas da barra 844, são mostradas na Figura 34 demonstra os níveis de tensão da barra 844. Teve tensões abaixo do limite inferior estabelecido de 0.93 pu, nos horários 4:00, 05:00, 16:00 e 17:00 hrs. As demais atuações foram devido as violações em outras barras do sistema.

Analisando a curva de potência reativa da subestação com a curva de potência reativa resultante através do controle por perdas (Figura 35) pode-se notar que através da atuação bancos de capacitores e injeção de reativo através dos geradores, a partir das 15:00 hrs é uma curva que apresenta leves oscilações em comparação a curva sem atuação dos controladores.

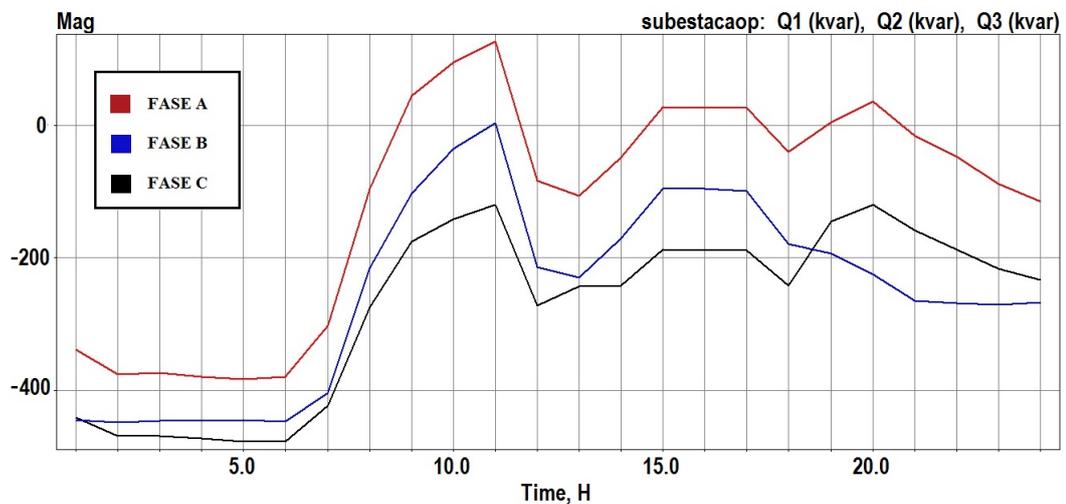


Figura 35 – Curvas de potência reativa final através do controle por perdas.

### 5.3.3 Controle Combinado

Para a realização do teste combinado, é escolhido o equipamento em que se tenha um grau de efetividade alta e que possua as menores perdas possíveis ao mesmo tempo, para realizar o controle Volt/VAr. A Tabela 8, mostra a atuação dos equipamentos, nas 24 horas de um dia.

Tabela 8 – Comportamento dos Equipamentos através do Controle Combinado

| Hora | Pior Barra                   | Tensão (pu) | Reg. 1 (tap) | Reg. 2 (tap) | Cap. 1 (kVAr) | Cap. 2 (kVAr) | Ger. 1 (kVAr) | Ger. 2 (kVAr) | Ger. 3 (kVAr) |
|------|------------------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0    | -                            | -           | 0            | 0            | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             |
| 1    | 838                          | 0           | 0            | 0            | 0             | 0             | 0             | 0             | 90            |
| 2    | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 3    |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 4    | 890                          | 0.79        | 0            | +11          | 0             | 0             | 300           | 300           | 300           |
| 5    | 838                          | 0.89        | 0            | +16          | 450           | 0             | 300           | 300           | 300           |
| 6    | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 7    |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 8    |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 9    |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 10   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 11   | 890                          | 1.07        | 0            | 0            | 0             | 0             | 300           | 300           | 300           |
| 12   | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 13   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 14   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 15   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 16   | 838                          | 0.9         | 0            | +11          | 0             | 0             | 300           | 300           | 300           |
| 17   | 838                          | 0.88        | 0            | +16          | 450           | 450           | 300           | 300           | 300           |
| 18   | 890                          | 1.06        | 0            | +16          | 0             | 0             | 300           | 300           | 300           |
| 19   | Não houve violação de tensão |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 20   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 21   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 22   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 23   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |
| 24   |                              |             |              |              |               |               |               |               |               |

No primeiro horário ocorreu violação de tensão na barra 838, que de acordo com a combinação efetividade/menores perdas, o gerador 3 teve um grau de efetividade alta para a correção da tensão, com baixas perdas. A próxima violação ocorreu as 4:00 hrs, que com os três geradores e o regulador de tensão 2, foi possível elevar os níveis de tensão acima do limite de 0.93 pu. No horário seguinte necessitou da operação do capacitor 1 para a realização do controle Volt/VAr.

As 11:00 hrs houve uma sobretensão na barra 890, que esta localizada o gerador 2, que verificou-se que só com a retirada a injeção do reativo do capacitor não seria suficiente

para diminuir a tensão da barra violada, logo o próximo equipamento para realizar a mudança foi o regulador de tensão 2, no tap neutro.

No horário das 16:00 hrs ocorreu subtensão na barra 838, onde o regulador de tensão 2, volta a atuar para elevar os níveis de tensão da rede, porém para o próximo horário, as 17:00 hrs, essa configuração não foi suficiente para manter os níveis de tensão dentro dos limites, necessitou a injeção de reativos dos dois capacitores, para poder elevar a tensão acima de 0.93 pu. Para as 18:00 hrs os bancos de capacitores, são desligados por motivos da tensão exceder o limite superior aceitável na barra 890, que atingiu 1.06 pu, após a retirada dos mesmo a tensão se manteve dentro dos limites até as 24 horas.

Os níveis de tensão podem ser observados na Figura 36 da barra 838. Assim como nos testes anteriores, foi a barra que mais sofreu de subtensão durante as 24 horas, devido a sua localização na rede. As violações de tensão nessa barra ocorreram nos horários 1:00, 4:00, 5:00, 16:00 e 17:00 hrs.

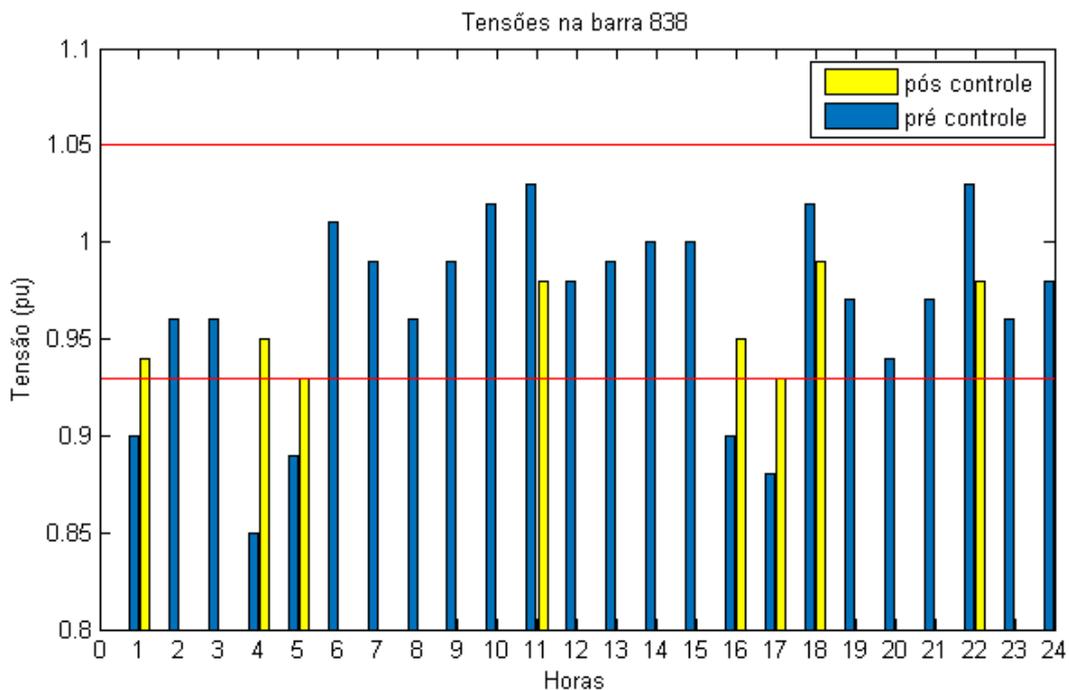


Figura 36 – Tensões nas 24 horas na barra 838 através do controle combinado.

A Figura 37 apresenta os níveis de tensão da barra 840. Aconteceu violação de tensão nessa barra nos mesmos horários da barra 838, tirando apenas o primeiro horário, no qual a tensão se encontrava a 0.93 pu, porém com a correção da tensão da barra 838, refletiu na elevação de tensão da barra 840 para níveis mais altos.

A atuação dos controladores no horário das 11:00, 18:00 e 22:00 hrs, foi devido a sobretensão na barra 890.

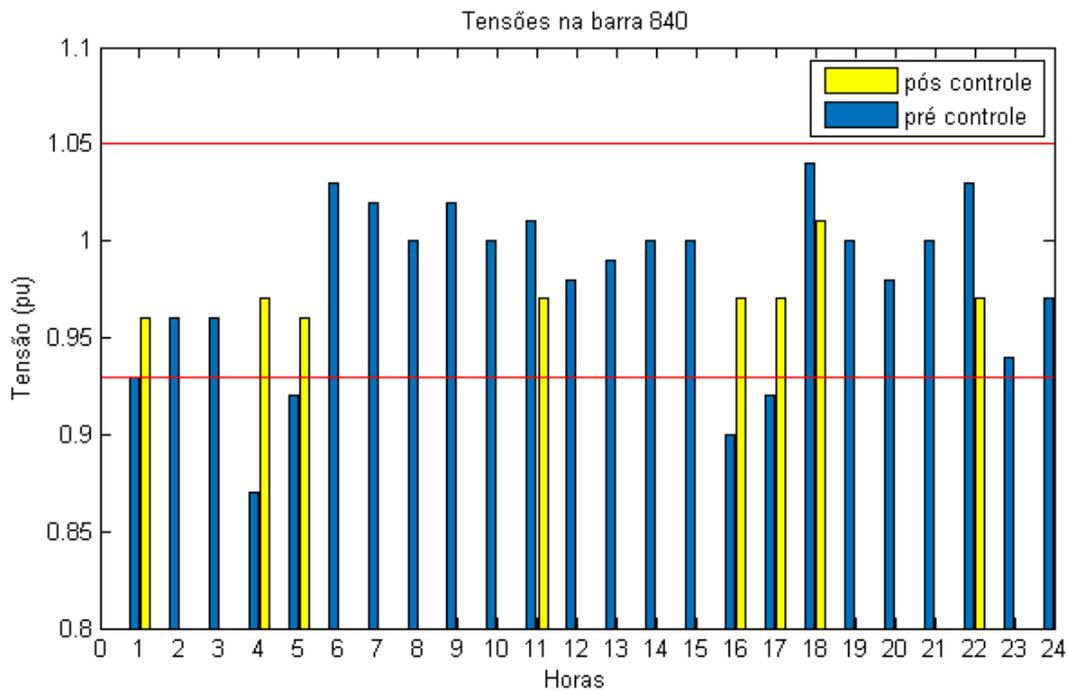


Figura 37 – Tensões nas 24 horas na barra 840 através do controle combinado.

Com pode-se observar os níveis de tensão da barra 890 na Figura 38, o ponto sofreu tanto com sobretensão e subtensão, violando os níveis de 1.05 e 0.93 pu respectivamente. Nota-se a passagem do limite superior nos horários 11:00, 18:00 e 22:00 hrs, a violação do limite inferior 1:00, 5:00 e 17:00 hrs.

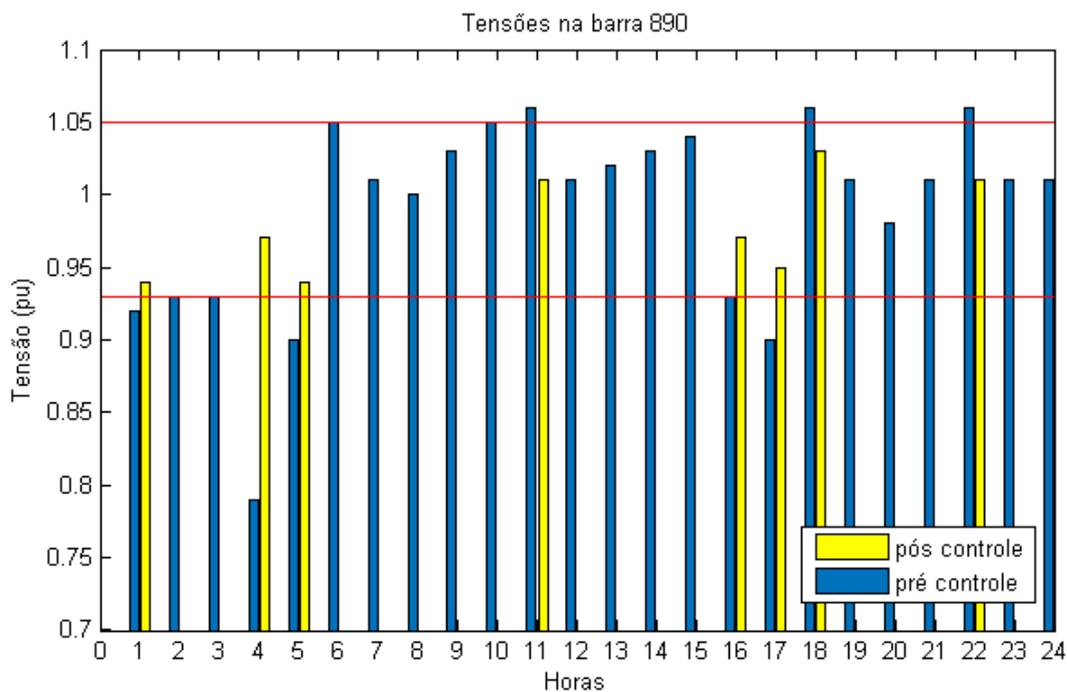


Figura 38 – Tensões nas 24 horas na barra 890 através do controle combinado.

As tensões em cada horário de um dia da barra 844, são mostradas na Figura 39. Nos horários 4:00, 05:00, 16:00 e 17:00 hrs, houve violação de tensão na barra. As demais atuações foram devido as violações em outras barras do sistema.

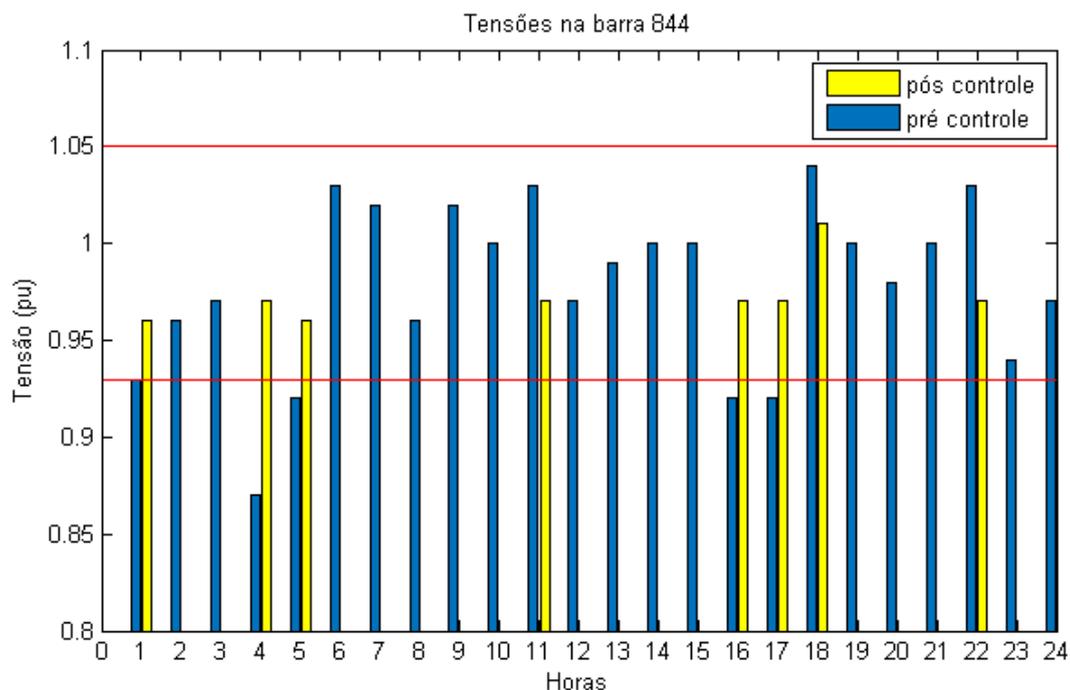


Figura 39 – Tensões nas 24 horas na barra 844 através do controle combinado.

A Figura 40 demonstra a curva de potência reativa resultante através do controle por combinado. Em comparação a curva de potência reativa da subestação, nota-se através da injeção de reativo na rede ocorreu a diminuição da carga reativa da subestação.

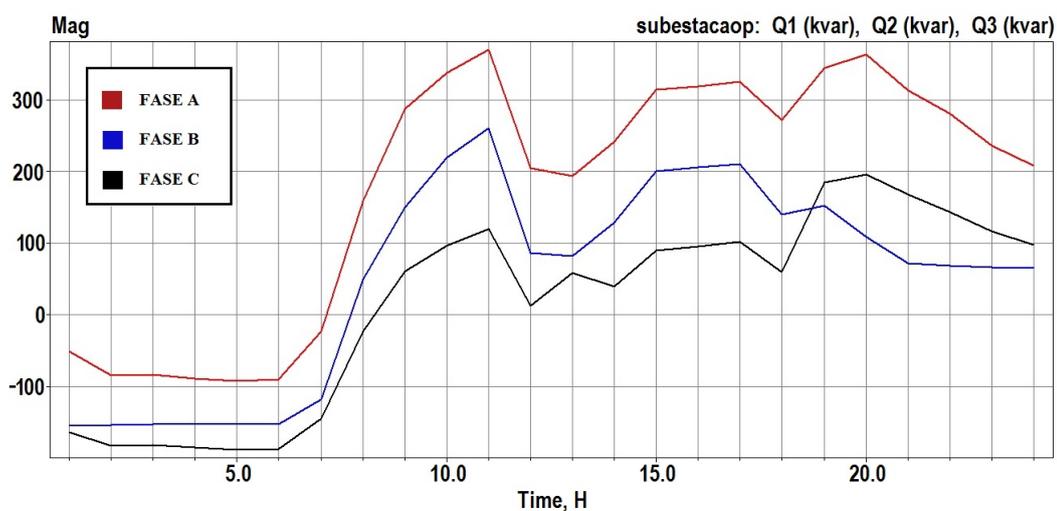


Figura 40 – Curvas de potência reativa final através do controle combinado.

No primeiro teste, que considerou somente a eficiência dos equipamentos para a correção de tensão, houve o predomínio do regulador de tensão 2, pois sua localização (nós

852-832) é próxima ao final da linha, onde os níveis de tensão são menores. O segundo mais eficiente foi o regulador de tensão 1, que por mais que sua localização não seja privilegiada, possui elevada capacidade na correção das violações de tensão. Quando o primeiro regulador não consegue corrigir a tensão, o regulador 2 é acionado, e caso ainda não seja possível estabelecer os níveis de tensão adequados são utilizados os geradores distribuídos 1 e 2.

O segundo teste, prioriza as perdas de energia sem levar em consideração a eficiência dos equipamentos. Teve como os primeiros equipamentos a atuar os capacitores, pois são os que obtiveram menores perdas, porém sozinhos não foram capazes de corrigir a tensão, então foi necessário o acionamento da geração distribuída, e por fim o regulador de tensão. Neste teste, o regulador de tensão 1 não chegou a atuar, pois é o equipamento que apresenta a maior perda para correção de tensão em comparação aos demais equipamentos presente no sistema.

O terceiro teste, que é a combinação entre eficiência e perdas, teve como equipamentos selecionados que apresentam uma elevada eficiência e baixa perdas, as GD's. Após a geração distribuída atuar, e não conseguir adequar os níveis de tensão, houve o acionamento dos bancos de capacitores, seguido do regulador de tensão 2.

De acordo com as três simulações, pode-se observar que os testes distintos conseguiram adequar a tensão global do sistema. A efetividade teve a menor quantidade de equipamentos utilizados para realizar o controle Volt/VAr, pois os equipamentos são os mais efetivos, logo os níveis de tensão, são elevados com maior facilidade, mas existe o predomínio de um mesmo equipamento para o controle.

Ao contrário da efetividade, o controle por perdas teve um maior número de equipamentos acionados para adequar a tensão da rede. Verificou-se que os equipamentos com menores perdas são os que possuem baixa efetividade para correção de tensão.

Por fim, o controle combinado, acionou uma quantidade moderada de equipamentos para o controle. A atuação dos controladores para a adequação de tensão foi necessária apenas em sete horas do dia, já o controle através da eficiência e perdas obtiveram a correção dos níveis de tensão em duas horas e uma hora a mais no dia respectivamente, em comparação ao teste combinado. Logo o controle combinado manteve os níveis de tensão na faixa adequada por maior tempo, portanto esse teste apresentou resultados mais satisfatórios.

## 6 Considerações finais

Com a crescente demanda por energia elétrica, aumentou as exigências de qualidade de energia. Com isso os níveis de tensão devem estar dentro dos limites estabelecido pela ANEEL, de  $0.93 pu$  a  $1.05 pu$ , para manter a tensão na faixa definida como adequada. O controle Volt/VAr é essencial para manter a tensão em níveis adequados em todos os pontos do alimentador de distribuição, considerando as mais diversas condições de operação do sistema.

O controle Volt/VAr pode ser realizado por vários métodos heurísticos e técnicas, como programação dinâmica (PD), algoritmos genéticos (AG), otimização por enxame de partículas (PSO) e inferência fuzzy, que foi o método utilizado neste trabalho, que teve como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para realização do controle Volt/VAr em um sistema de distribuição de energia, utilizando os dispositivos de controle na rede, com a contribuição da geração distribuída.

O controle coordenado dos equipamentos não é uma tarefa fácil de se realizar, pois com o conceito de *Smart Grids* difundido, ainda não são todas as redes de energia elétrica que são automatizadas, logo não possuem comunicação entre os dispositivos e entre a central de comando, tendo somente o ajuste *offline*. Então para a realização do controle Volt/VAr é necessário que seja possível o controle dos ajustes dos equipamentos de forma *online*.

Os controladores fuzzy poderiam ter maior sensibilidade no sinal de atuação, pois foram utilizados somente nove conjunto de regras em cada controlador, em que se aumentasse o número, passando para 16 ou 25 regras, os controladores teriam maior precisão. Também não foi estudado outros tipos de entrada nos controladores fuzzy, como por exemplo, ampacidade da linha, ponto de vista econômico, etc.

A metodologia desenvolvida apresentou resultados satisfatórios nos três diferentes testes realizados, comprovando a atuação dos controladores fuzzy, para uma rede de distribuição IEEE 34 barras. O teste de efetividade demonstrou a atuação em nove horários, já o teste por perdas, foram necessárias correções em oito horários, porém o teste por efetividade necessitou de menos equipamentos para normalização de tensão da rede comparado ao teste de perdas que necessitou de quase todos os equipamentos dispostos no sistema. O teste da combinação de perdas e efetividade se mostrou o melhor, por combinar menores perdas com maior efetividade dos equipamentos, no qual destacou o uso da geração distribuída para a correção de tensão global do sistema, tendo a atuação em apenas sete horários do dia.

As simulações realizadas foram para uma curva horária de 24 horas, com cargas

residenciais e industriais. O algoritmo desenvolvido no *software* MATLAB em conjunto com *OpenDSS*, conseguiu solucionar quando houve sub ou sobretensão na rede, através dos equipamentos de controle de forma conjunta, utilizando reguladores de tensão, banco de capacitores e geração distribuída.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Com base nos resultados obtidos, algumas sugestões para continuidade do trabalho são:

- Inclusão de outras entradas dos controladores fuzzy;
- Limitação de operações;
- Custos para a realização do controle Volt/VAr.

## Referências

ALEXIS, D.; RODEZNO, Q. *Controle de tensão e reativos em redes de distribuição de energia elétrica*. 100 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2014. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 31.

BREMERMANN, L. E. *Controle fuzzy volt/var em sistemas de distribuição*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 28, 35, 41, 42 e 46.

CARVALHO, P.; FERREIRA, L. Power System Planning and Implementation On the Robust Application of Loop Optimization A Heuristic and Algorithmic Combined Approach for Reactive Power Optimization with Time-Varying Load Demand in Distribution Systems Substations Time Domain Analysis of. n. October, p. 2002, 2002. Citado na página 26.

CAVALCANTI, J. H. F. et al. *Lógica Fuzzy Aplicada às Engenharias*. p. 151, 2012. Citado na página 35.

FARIVAR, M. et al. Optimal inverter VAR control in distribution systems with high PV penetration. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, p. 1–7, 2012. ISSN 19449925. Citado na página 33.

FUENTES, V. Fuzzy inference system for volt/var control in distribution in isolated power system. 2009. Citado na página 28.

IBRAHIM, M.; SALAMA, M. M. A. Smart distribution system volt / VAR control using distributed intelligence and wireless communication. n. August 2014, p. 307–318, 2015. Citado na página 22.

JAHANGIRI, P. et al. Distributed Volt / VAR Control by PV Inverters. v. 28, n. 3, p. 3429–3439, 2013. Citado na página 33.

KIM, I.; MEMBER, S.; HARLEY, R. G. Optimal Distributed Generation Allocation on Distribution Networks at Peak Load and the Analysis of the Impact of Volt / Var Control on the Improvement of the Voltage Profile. p. 2–6, 2014. Citado na página 25.

KIM, Y.-J. et al. Coordinated Control of a DG and Voltage Control Devices Using a Dynamic Programming Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 1, p. 42–51, 2013. ISSN 0885-8950. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6210417>>. Citado na página 25.

KROK, M. J.; GENÇ, S. A coordinated optimization approach to Volt/VAR control for large power distribution networks. *Proc. of the 2011 American Control Conference*, p. 1145–1150, 2011. ISSN 0743-1619. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5991606>>. Citado na página 25.

LIANG, R.-h.; WANG, Y.-s. Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 2, p. 610–618, 2003. ISSN 0885-8977. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1193885>>. Citado na página 26.

LIMA, R. *Redes Neurais Artificiais Aplicadas no Controle de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2007. 103 p. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

LU, F.-C.; HSU, Y. Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, v. 142, n. 6, p. 639–645, 1995. ISSN 13502360. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp={&}arnumber=668317{&}contentType=Journals+{&}+Magazines{&}queryText=Reactive+power/voltage+control+in+a+distribution+substation+using+dynamic>>. Citado na página 25.

LUGTU, R. L.; IEEE, M. Volt/VAr control algorithm for modern distribution management system. v. 10, n. 3, p. 1454–1460, 1995. Citado na página 28.

MADRUGA, E. Otimização de níveis de tensão nas redes de distribuição considerando a alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão. p. 84, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 31.

MARRO, A. et al. Lógica Fuzzy: Conceitos e aplicações. 2000. Disponível em: <[http://aquilesburlamaqui.wdfiles.com/local--files/logica-aplicada-a-computacao/texto{\\\_}fuzzy.>](http://aquilesburlamaqui.wdfiles.com/local--files/logica-aplicada-a-computacao/texto{\_}fuzzy.>) Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.

MEIER, A. V. *Distribution system voltage management and optimization for integration of renewables and electric vehicles*. California, 2013. 21 p. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 32.

MIRANDA, V.; CALISTO, P. Fuzzy Inference System To Voltage / Var Control in Dms - Distribution Management System. n. June, p. 24–28, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 26, 45 e 46.

MOHAPATRA, A. et al. An Efficient Hybrid Approach for Volt/Var Control in Distribution Systems. v. 29, n. 4, p. 1780–1788, 2014. Citado na página 26.

ORTEGA, N. R. S. Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina. p. 166, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 41.

PARK, J.-k.; NAM, S.-r. Control of a ULTC considering the dispatch schedule of capacitors in a distribution system. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 22, n. 2, p. 755–761, 2007. ISSN 0885-8950. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{\\\_}all.jsp?arnumber=4162](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{\_}all.jsp?arnumber=4162)>. Citado na página 25.

PEREIRA, P. D. S.; COSTA, R. D. Métodos Para Otimização Dos Ajuste Dos Reguladores De Tensão E Zonas De Tap Em Sistemas De Distribuição. *Cascavel.Cpd.Ufsm.Br*, 2009. Disponível em: <[http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde{\\\_}arquivos/7/TDE-2010-01-12T132826Z-2400/Publico/PEREIRA,PAULORICARDODASILVA.>](http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde{\_}arquivos/7/TDE-2010-01-12T132826Z-2400/Publico/PEREIRA,PAULORICARDODASILVA.>) Citado na página 31.

RAHIMI, S.; MARINELLI, M.; SILVESTRO, F. Evaluation of requirements for Volt/Var control and optimization function in distribution management systems. *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition, ENERGYCON 2012*, p. 331–336, 2012. Citado na página 22.

RIGNEL, D. G. d. S.; CHENCI, G. P.; LUCAS, C. A. Uma introdução a lógica fuzzy. *Revista eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica*, v. 01, n. 01, p. 17–28, 2011. ISSN 2237-0072. Citado na página 36.

ROYTELMAN, I.; GANESAN, V. Coordinated local and centralized control in distribution management systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 2, p. 718–724, 2000. ISSN 08858977. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

SALLES, D.; PINTO, A.; FREITAS, W. Integrated volt/Var control in modern distribution power systems based on support vector machines. *INTERNATIONAL TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS*, 2016. Citado na página 28.

SMITH, J. W. et al. Smart inverter volt/var control functions for high penetration of PV on distribution systems. *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2011*, p. 1–6, 2011. Citado na página 33.

TANSCHKEIT, R. Sistemas Fuzzy. *LN Sistemas - DEE-PUC-Rio*, v. 113, p. 113–134, 2012. Disponível em: <<http://www2.ica.ele.puc-rio.br/Downloads/41/LN-SistemasFuzzy.pdf>>. Citado na página 36.

TOOLBOX, F. L. Fuzzy Logic Toolbox. 1995. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/fuzzy-logic/demos.html>>. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 39.

TURITSYN, K. et al. Options for control of reactive power by distributed photovoltaic generators. *Proceedings of the IEEE*, v. 99, n. 6, p. 1063–1073, 2011. ISSN 00189219. Citado na página 27.

ULINUHA, A.; MASOUM, M. A. S.; ISLAM, S. M. Optimal Scheduling of LTC and Shunt Capacitors in Large Distorted Distribution Systems Using Evolutionary-Based Algorithms. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 1, p. 434–441, 2008. ISSN 0885-8977. Citado na página 26.

VAZIRI, M. Y. et al. Volt/VAr Regulation and Issues with High Penetration of Renewables on Distribution Systems. p. 519–524, 2012. Citado na página 25.

ZANETTE, A.; RADANOVITSCK, E. A.; GONÇALVES, W. W. Fuzzy Logic (Lógica Difusa). 2006. Citado na página 35.