

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**ELÉTRICA**

**SISTEMA DE CONTROLE SECUNDÁRIO DE TENSÃO**  
**BASEADO EM LÓGICA *FUZZY***

**MARCOS VINÍCIUS SANTOS**

**ITAJUBÁ, Março de 2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**ELÉTRICA**

**MARCOS VINÍCIUS SANTOS**

**SISTEMA DE CONTROLE SECUNDÁRIO DE TENSÃO**  
**BASEADO EM LÓGICA FUZZY**

**Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.**

**Área de Concentração:** Sistemas Elétricos de Potência

**Orientador:** Prof. Antonio Carlos Zambroni de Souza

**Co-orientador:** Prof. Benedito Isaías de Lima Lopes

**Março de 2013**  
**ITAJUBÁ - MG**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**ELÉTRICA**

**MARCOS VINÍCIUS SANTOS**

**SISTEMA DE CONTROLE SECUNDÁRIO DE TENSÃO**  
**BASEADO EM LÓGICA FUZZY**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 14 de Março de 2013, conferindo ao autor o título de ***Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.***

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza (Orientador)

Prof. Dr. Benedito Isaías de Lima Lopes (Co-orientador)

Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi

Prof. Dr. Cairo Lúcio Nascimento Júnior

**Março de 2013**  
**ITAJUBÁ - MG**



Ministério da Educação  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

## **A N E X O II**

### **FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Título da "Sistema de Controle Secundário de Tensão Baseado em  
Dissertação: Lógica FUZZY"

Autor: **Marcos Vinicius Santos**

#### **JULGAMENTO**

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente	
1º	A	60 M
2º	A	Paulo Paulo
3º	A	Folha:
4º	A	

**Observações:**

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.


**Este documento terá a validade de 60 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.**

Resultado Final: Conceito: APROVADO, ou seja, APROVADO

Observações: \_\_\_\_\_

Itajubá, 14 de Março de 2013.

  
Prof. Dr. Cairo Lúcio Nascimento Júnior  
1º Examinador - ITA

  
Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi  
2º Examinador - UNIFEI

  
Prof. Dr. Benedito Isaias Lima Lopes  
3º Examinador (Co-Orientador) - UNIFEI

  
Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza  
4º Examinador (Orientador) - UNIFEI

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter me proporcionado as condições necessárias para que eu pudesse concretizar este trabalho. Fonte de toda a sabedoria e responsável por me fortalecer nos momentos de conflitos.

Agradeço aos meus pais, Nilza e Antônio Marcos, pelo apoio e zelo incondicional a minha caminhada. A minha irmã, Simone, pelos inúmeros conselhos que me motivaram a seguir o caminho da pesquisa. Aos familiares, os quais compartilharam os momentos de felicidade que foram essenciais na trajetória do mesmo.

A minha amada esposa, Sammela, pelo companheirismo, dedicação e amor que foram, sem dúvidas, a fonte de minha sustentação durante toda esta batalha.

Ao meu orientador, professor Antonio Carlos Zambroni de Souza, que me recebeu de braços abertos e, sempre, com muito entusiasmo. Sua alegria e suas palavras serviram, continuamente, como motivação para o desenvolvimento deste trabalho, bem como a minha vontade de avançar para o doutorado.

Ao meu co-orientador, professor Benedito Isaías de Lima Lopes, pelo apoio e pelas sugestões para o aprimoramento do trabalho.

Aos meus amigos, Eduardo Henrique, Gabriel Einhardt, Luan Hirano, Marcel Araújo, Samir Ferreira e Roger Dupont, que mesmo fisicamente distantes tiveram, cada um, uma participação importante ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos e companheiros do grupo GESis, Adriano Almeida, Aurélio Coelho, Cibele Cassiano, Dabit Sonoda, Denisson Oliveira, Diogo Marujo, Eliara Passos, Leonel Carvalho, Luís Lima, Paulo Pessoti, Marcell Carvalho, Silas Souza e Silvan Flávio, pelos momentos de felicidades e discussões criadas durante o café que foram de grande ajuda ao meu crescimento pessoal.

A todos que de alguma forma dirigiram suas orações a mim.

A CNPq, pelo auxílio financeiro durante a execução deste trabalho.

*“Não tente se tornar um homem de sucesso, mas sim um homem de valor”.*

Albert Einstein

## RESUMO

As dimensões dos atuais sistemas elétricos de potência adicionam uma maior complexidade a operação e controle do perfil de tensão dos barramentos do sistema. No caso do Controle Secundário de Tensão, onde o controle efetivo do fluxo de potência reativa é um dos principais objetivos, a dificuldade de operação está intimamente relacionada à coordenação dos elementos de controle diante de condições operativas desfavoráveis, como a perda de capacidade de geração de potência reativa por parte das unidades geradoras e compensadores síncronos. Este conduz o sistema a tensões operativas fora dos limites de tensão pré-estabelecidos. Esta coordenação é, normalmente, gerenciada pelos operadores do sistema elétrico, os quais atuam sobre os elementos de controle com base na análise das informações de telemetria e na experiência adquirida sobre o sistema. Entretanto, diante de cenários muito carregados e com presença de máquinas com geração de potência reativa fora dos limites operativos, a coordenação torna-se uma tarefa complexa.

Portanto, este trabalho propõe uma metodologia para o desenvolvimento de um sistema de controle secundário de tensão que obedeça aos critérios operativos de tensão sem prejudicar a margem de estabilidade de tensão. Para tal, utiliza-se a técnica de análise modal aliada a teoria de conjuntos *fuzzy* para o estabelecimento de um sistema de controle *fuzzy*.

Diferentes cenários de carregamento do sistema são utilizados para a demonstração da atuação do sistema de controle secundário de tensão baseado em lógica *fuzzy*, os quais evidenciam a coordenação dos elementos de controle e a manutenção da margem de carga do sistema.

*Palavras-chave:* Controle Secundário de Tensão; Estabilidade de Tensão; Análise Modal; Conjuntos *Fuzzy*; Controle *Fuzzy*.

## ABSTRACT

The dimensions of the current electric power systems increase the complexity of the operation and control of the voltage profile of the system buses. In the case of Secondary Control Voltage, where an effective control of reactive power flow is a major goal, the difficulty in the system operation is closely related to the coordination of the voltage control devices front of complex operating scenarios, such as loss of reactive power generation capacity by the generating units and synchronous compensators. This leads to operational voltages beyond the limits predefined by technical studies.

The voltage control devices coordination are usually accomplished by the power system operators, which act on the available devices based on telemetry information and their own knowledge about the system. However, in highly loaded scenarios with presence of units with reactive power generation off the operating limits, the coordination becomes a complex task.

Therefore, this research proposes a methodology for developing a secondary voltage control system that meets the voltage operating criteria and, properly, attempts not to depreciate the voltage stability margin. For this, it is used the technique of mode-shape analysis combined with fuzzy set theory for the establishment of a fuzzy control system.

In order to demonstrate the performance of the secondary voltage control based on fuzzy logic, different load scenarios are considered. It is seen that the proposal confirms the coordination of the control elements and the maintenance of the load margin system.

*Keywords:* Secondary Voltage Control; Voltage Stability; Mode-Shape Analysis; Fuzzy Sets; Fuzzy Control;



# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>iv</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 Revisão Literária .....	17
1.2 Motivação e Objetivo .....	23
1.3 Organização da Dissertação .....	24
<b>2 ÁREAS DE CONTROLE POR ANÁLISE MODAL</b> .....	<b>25</b>
2.1 Formulação do Problema de Fluxo de Potência.....	26
2.2 Análise Modal .....	30
2.2.1 Autovalores.....	31
2.2.2 Autovetores.....	31
2.2.3 Propriedades dos autovalores e autovetores.....	32
2.2.4 Características do <i>Mode-Shape</i> .....	34
2.3 Áreas de Controle pelo <i>Mode-Shape</i> .....	34
2.3.1 Seleção de áreas de controle .....	38
2.4 Vetor Tangente .....	41
<b>3 SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY</b> .....	<b>43</b>
3.1 Conjuntos difusos.....	44
3.2 Tipos de funções de pertinência.....	46
3.3 Operações em conjuntos difusos.....	46
3.4 Regras <i>fuzzy</i> .....	47
3.5 Métodos de Defuzzificação.....	48
3.6 Sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	49
<b>4 SISTEMA DE CONTROLE SECUNDÁRIO DE TENSÃO BASEADO EM LÓGICA FUZZY</b> .....	<b>51</b>
4.1 Considerações Iniciais .....	53

4.2	Definição das subáreas de controle pelo <i>Mode-Shape</i> .....	55
4.3	Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i> .....	61
4.3.1	Primeiro estágio de controle .....	62
4.3.2	Segundo estágio de controle .....	66
4.4	Fluxogramas de desenvolvimento e operação do Sistema <i>Fuzzy</i> .....	71
5	RESULTADOS.....	73
5.1	Sistema sem a coordenação de controle.....	73
5.2	Controle secundário de tensão por lógica <i>fuzzy</i> .....	76
5.2.1	Caso base.....	76
5.2.2	Caso com múltiplas violações de tensão .....	79
5.2.3	Caso com violações de tensão opostas .....	82
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	88
6.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91
	APÊNDICES .....	95
A.	Parametrização das funções de pertinência.....	95
B.	Dados de barra utilizados para o Sistema IEEE 118 .....	100
	ANEXOS .....	103
A.	Sistema acadêmico IEEE118 .....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - <i>Mode-shape</i> do autovalor $\lambda_1$ para o sistema IEEE14 .....	39
Figura 2.2 - <i>Mode-shape</i> do autovalor $\lambda_2$ para o sistema IEEE14 .....	39
Figura 2.3 - <i>Mode-shape</i> do autovalor $\lambda_3$ para o sistema IEEE14 .....	40
Figura 3.1 - Funções de pertinência (a) discreta e (b) contínua .....	45
Figura 3.2 - Universo de discurso "Idade" dividido em três conjuntos <i>fuzzy</i> .....	45
Figura 3.3 - Esquema de aplicação de um sistema de inferência <i>fuzzy</i> em uma malha de controle.....	50
Figura 4.1 - <i>Mode-Shape</i> para o autovalor $\lambda_2$ do sistema IEEE 118.....	53
Figura 4.2 - <i>Mode-Shape</i> para o autovalor $\lambda_3$ do sistema IEEE 118.....	54
Figura 4.3 - Primeiros componentes do <i>Mode-Shape</i> da Área 3.....	56
Figura 4.4 - Componentes subsequentes do <i>Mode-Shape</i> da Área 3.....	57
Figura 4.5 - <i>Mode-shape</i> do autovalor crítico do sistema.....	58
Figura 4.6 - Subáreas 3A e 3B definidas pelo <i>mode-shape</i> da área 3 .....	59
Figura 4.7 - Subárea 3C definida pelo <i>mode-shape</i> da área 3.....	59
Figura 4.8 - Delimitação de áreas e subáreas para o sistema IEEE 118 .....	61
Figura 4.9 - Esquema de controle secundário de tensão aplicado a uma subárea ...	62
Figura 4.10 - Primeiro estágio de controle <i>fuzzy</i> .....	63
Figura 4.11 - Funções de pertinência de entrada do 1º estágio .....	63
Figura 4.12 - Funções de pertinência associadas a saída do 1º estágio .....	64
Figura 4.13 - Segundo estágio de controle <i>fuzzy</i> .....	66
Figura 4.14 - Funções de pertinência para as entradas de reserva de potência reativa do 2º Estágio .....	67
Figura 4.15 - Funções de pertinência associadas a saída do 2º estágio.....	68
Figura 4.16 - Funções de pertinência associadas a saída do 2º estágio.....	69
Figura 4.17 - Fluxograma de desenvolvimento dos Sistemas <i>Fuzzy</i> .....	71
Figura 4.18 - Fluxograma de operação do Sistema <i>Fuzzy</i> .....	72
Figura 5.1 - Perfil de tensão da Subárea 2A sem coordenação dos ECT .....	74
Figura 5.2 - Perfil de tensão da Subárea 2A com CST- <i>Fuzzy</i> .....	77
Figura 5.3 - Perfis de tensão do sistema IEEE 118 com múltiplas violações .....	79
Figura 5.4 - Perfil de tensão das barras presentes nas Subáreas 3A e 3C.....	80
Figura 5.5 - Perfil de tensão da subárea 2A para o Caso 2.....	83

Figura 5.6 - Perfil de tensão da subárea 2B para o Caso 2.....	83
Figura 5.7 - Perfil de tensão da Subárea 2A para o Caso 2 após o CST- <i>Fuzzy</i> .....	84
Figura 5.8 - Perfil de tensão da subárea 2B para o Caso 2 após o CST- <i>Fuzzy</i> .....	84
Figura A.1 - Função de pertinência Triangular .....	95
Figura A.2 - Função de pertinência Trapezoidal.....	96
Figura A.3 - Função de pertinência Gaussiana .....	97
Figura A.4 - Função de pertinência Sino .....	98
Figura A.5 - Função de pertinência Sigmoide .....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Autovalores de $J_{sqv}$ em ordem crescente para o sistema IEEE14 .....	38
Tabela 2.2 - Áreas de controle definidas pelos autovalores de $J_{sqv}$ .....	40
Tabela 4.1 - Descrição das áreas de controle para o sistema IEEE 118.....	54
Tabela 4.2 - Ranking dos cinco primeiros componentes do vetor tangente .....	58
Tabela 4.3 - Descrição das subáreas definidas para a Área 3.....	60
Tabela 4.4 - Descrição das áreas e subáreas definidas para o sistema IEEE 118 ...	60
Tabela 4.5 - Dicionário das variáveis linguísticas da entrada do 1º estágio .....	63
Tabela 4.6 - Dicionário de ações associadas a saída do 1º estágio .....	64
Tabela 4.7 – Síntese dos sistemas <i>fuzzy</i> para o 1º estágio .....	66
Tabela 4.8 - Dicionário das variáveis linguísticas da entrada do 2º estágio .....	68
Tabela 4.9 - Dicionário de ações associadas a saída do 2º estágio .....	69
Tabela 4.10 – Síntese dos sistemas <i>fuzzy</i> para o 2º estágio .....	70
Tabela 5.1 - Proporções de aumento de carga para o Caso base .....	74
Tabela 5.2 - Descrição dos barramentos analisados para o Caso base .....	75
Tabela 5.3 - Margem de carga para o Caso Base.....	75
Tabela 5.4 - Situação dos ECT após o controle não coordenado .....	76
Tabela 5.5 - Situação dos ECT com o CST- <i>Fuzzy</i> .....	77
Tabela 5.6 - Comparação da margem de carga do sistema com o CST- <i>Fuzzy</i> .....	78
Tabela 5.7 - Vetor tangente para o Caso base no ponto de colapso .....	78
Tabela 5.8 - Proporções de aumento de carga para o Caso 1 .....	79
Tabela 5.9 - Situação dos ECT após o CST- <i>Fuzzy</i> .....	81
Tabela 5.10 - Margem de carga do sistema para o Caso 1.....	81
Tabela 5.11 - Vetor tangente para o Caso 1 no ponto de colapso .....	81
Tabela 5.12 - Proporções de aumento de carga para o Caso 2.....	82
Tabela 5.13 - Situação dos ECT após o CST- <i>Fuzzy</i> .....	85
Tabela 5.14 - Margem de carga para o Caso 2.....	86
Tabela 5.15 - Vetor tangente para o Caso 2 no ponto de colapso .....	86

## LISTA DE SIGLAS

APF	: <i>Active power factor.</i>
AVR	: <i>Automatic voltage control.</i>
CCT	: Controle coordenado de tensão.
CER	: Compensador estático de reativo.
CFIS	: <i>Continuous fuzzy inference system.</i>
CRT	: Controle remoto de tensão.
CSC	: Capacitor série controlável.
CST	: Controle secundário de tensão.
DFIS	: <i>Discrete fuzzy inference system.</i>
ECT	: Equipamentos de controle de tensão.
FIS	: <i>Fuzzy inference system.</i>
JLDC	: <i>Joint line drop compensation.</i>
JVC	: <i>Joint voltage control.</i>
MF	: <i>Membership function.</i>
RNA	: Redes neurais artificiais.
SIN	: Sistema interligado nacional.
VT	: Vetor tangente.

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\Delta P$  : Representa o vetor de erros das equações de potência ativa.
- $\Delta Q$  : Representa o vetor de erros das equações de potência reativa.
- $\Delta \theta$  : Representa o vetor de variações angulares das tensões nas barras.
- $\Delta V$  : Representa o vetor de variações das magnitudes das tensões.
- $H, N, M, L$  : Submatrizes que compõem a matriz Jacobiana de fluxo ( $J_{ca}$ ).
- $J_{ca}$  : Jacobiana de fluxo de carga.
- $\partial P / \partial \theta$  : Derivada parcial da potência ativa em relação ao ângulo da tensão.
- $\partial P / \partial V$  : Derivada parcial da potência ativa em relação ao módulo da tensão.
- $\partial Q / \partial \theta$  : Derivada parcial da potência reativa em relação ao ângulo da tensão.
- $\partial Q / \partial V$  : Derivada parcial da potência reativa em relação ao módulo da tensão.
- $\Delta y$  : Representa o vetor de erros das novas equações do sistema.
- $\Delta x$  : Representa o vetor de variações das novas variáveis de estado.
- $\partial y / \partial \theta$  : Derivada parcial da nova equação do sistema em relação ao ângulo da tensão.
- $\partial y / \partial V$  : Derivada parcial da nova equação do sistema em relação ao módulo da tensão.
- $\partial P / \partial x$  : Derivada parcial da potência ativa em relação às novas variáveis de estado.
- $\partial Q / \partial x$  : Derivada parcial da potência reativa em relação às novas variáveis de estado.
- $\partial y / \partial x$  : Derivada parcial da nova equação do sistema em relação às novas variáveis de estado.
- $P^{esp}$  : Potência ativa líquida especificada na barra.
- $P^{cal}$  : Potência ativa calculada pelo método de Newton-Raphson na barra.
- $P_G$  : Potência ativa injetada na barra.
- $P_L$  : Potência ativa absorvida na barra.
- $Q^{esp}$  : Potência reativa líquida especificada na barra.
- $Q^{cal}$  : Potência reativa calculada pelo método de Newton-Raphson na barra.
- $Q_G$  : Potência reativa injetada na barra.
- $Q_L$  : Potência reativa absorvida na barra.
- $\Delta v$  : Representa o vetor de erros das equações de potência ativa e reativa.

$\Delta u$	: Representa o vetor de variações das variáveis de estado.
$J$	: Matriz jacobiana expandida.
$J_{vx}$	: Matriz das derivadas parciais das equações de potência ativa e reativa em relação às novas variáveis de estado.
$J_{yu}$	: Matriz das derivadas parciais das novas equações do sistema em relação às variáveis de estado originais.
$J_{yx}$	: Matriz das derivadas parciais das novas equações do sistema em relação às novas variáveis de estado do sistema.
$\lambda_i$	: Autovalor associado ao autovetor à direita.
$\phi_i$	: Autovetor à direita.
$\Psi_i$	: Autovetor à esquerda.
$\Lambda$	: Matriz de autovalores do sistema.
$\Phi$	: Matriz de autovetores à direita.
$\Psi$	: Matriz de autovetores à esquerda.
$\lambda_{VT}$	: Parâmetro para cálculo do vetor tangente.
$\Delta\lambda_{VT}$	: Vetor de variação do parâmetro do vetor tangente.
$\mu_A$	: Função de pertinência para o conjunto <i>fuzzy</i> $A$ .
$V_{C_i}$	: Tensão do barramento de carga $i$ .
$\Delta V_{G_k}$	: Variação da referência de tensão dos elementos de controle.
$V_{CA}$	: Variável indicativa de necessidade de controle de tensão.
$RQ_{G_k}$	: Reserva de potência reativa do elemento de controle $k$ .
$Q_{G_k}$	: Potência reativa gerada no elemento de controle $k$ .
$Q_{k_{min}}$	: Limite mínimo de geração de potência reativa.
$Q_{k_{máx}}$	: Limite máximo de geração de potência reativa.



# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento da demanda de carga somado a disponibilidade de amplos recursos hídricos distantes dos grandes centros consumidores impulsionou o desenvolvimento de imensos corredores de transmissão de energia. Ademais, a grande diversidade pluviométrica das bacias hidrográficas disponíveis no país e a necessidade de melhorias na confiabilidade do sistema elétrico culminaram na criação do Sistema Interligado Nacional (SIN).

A interligação entre diversas áreas dos sistemas elétricos de potência proporciona diversos benefícios, entre os quais podem-se citar: uma maior capacidade do sistema em suprir os desbalanços de carga/geração, redução de custos, maior disponibilidade de recursos para manutenção do controle de frequência, além da criação de um grande mercado de energia elétrica [1].

Entretanto, sob o enfoque do controle do sistema elétrico, a interligação cria enormes dificuldades na coordenação dos elementos de controle de tensão(ECT) presentes na rede elétrica. Em relação aos elementos de controle de tensão, o problema torna-se maior. Devido à impossibilidade da transmissão de potência reativa por longas distâncias, o controle de tensão deve ser realizado localmente, o qual realizado sem o correto planejamento pode aumentar os riscos de eventuais problemas no sistema.

Atualmente, o controle de tensão de um sistema de energia elétrica é realizado através dos operadores do sistema, os quais, baseados em informações de grandezas elétricas reais e estados de equipamentos disponíveis nos centros de controle, nos procedimentos de operação da rede e na própria experiência, atuam nos elementos de controle de tensão a fim de corrigir eventuais desvios de tensão. Estas ações, por sua vez, podem ser realizadas por telecomando através dos sistemas de supervisão e controle, ou ainda, por comunicação verbal entre os diversos operadores do sistema [2] e [3].

Sob o ponto de vista de estabilidade, o controle de tensão do sistema e, conseqüentemente, a modificação do fluxo de potência reativa nos circuitos, possui um papel fundamental para a manutenção da estabilidade de tensão do sistema. Isto

deriva da grande relação entre os problemas de instabilidade de tensão com a escassez de suporte de potência reativa nas áreas críticas do sistema elétrico. Logo, o aumento de tensão de uma área do sistema com o intuito de elevar o perfil de tensão da mesma pode, em alguns casos, sobrecarregar as linhas desta área, aumentando as perdas elétricas do sistema e, por fim, deteriorar a margem de estabilidade do mesmo.

Assim sendo, o controle de tensão de um sistema elétrico necessita atender os limites operativos impostos pelos estudos pré-operativos, porém deve, concomitantemente, proporcionar estratégias adequadas para o controle de tensão do sistema com o intuito de manter uma margem de estabilidade de tensão satisfatória a operação segura do sistema. Neste sentido, faz-se necessário garantir reservas de potência reativas apropriadas nos geradores e compensadores disponíveis, além de diretrizes de operação que previnam situações de instabilidade.

Diante da crescente complexidade dos cenários de carga, da inserção de dispositivos eletrônicos de controle em diversos pontos do sistema e do aumento da incerteza na geração devido à penetração de energias renováveis, a atuação dos operadores do sistema aproxima uma realidade desafiadora.

Portanto, sistemas automatizados ou de apoio às ações de controle necessárias para uma operação segura e satisfatória tornam-se ferramentas cruciais à manutenção da operação frente aos eminentes desafios do sistema elétrico.

## **1.1 Revisão Literária**

Sistemas de auxílio ao controle de tensão que forneçam de maneira eficaz a coordenação dos diversos elementos de controle do sistema a fim de atingir os objetivos requeridos em procedimentos de rede e segurança da operação originaram o desenvolvimento de diversos trabalhos, os quais utilizam as mais diversificadas técnicas e filosofias.

Como a compensação reativa afeta tanto o regime permanente quanto o regime transitório do sistema, estudos detalhados de fluxo de potência e estabilidade devem ser realizados para estabelecer esquemas apropriados de compensação.

Diante disso, diversos autores estudam o problema através de análises de sensibilidade detalhadas para compreender as relações entre os elementos do sistema e o fluxo de potência reativa. Estes estudos são essenciais para a fundamentação e utilização de técnicas de otimização para resolução do problema.

Ainda, com o crescente aumento em estudos na área de Inteligência artificial, muitos trabalhos destinaram-se a abordar a aplicação direta de ferramentas e técnicas para o controle coordenado de tensão.

A característica não-linear dos sistemas elétricos de potência exige a execução de grandes quantidades de análises para o entendimento e desenvolvimento de um sistema de controle qualquer. Diante das características adaptativas e de identificação de padrões inerentes das técnicas de inteligência artificial, diversos autores utilizam-se destas para a resolução do problema de controle de tensão e potência reativa.

Em [4] o autor utiliza Redes Neurais Artificiais (RNA) para calcular o menor valor singular da matriz jacobiana e ordenar as contingências mais severas do sistema sob o ponto de vista de estabilidade de tensão. Desta forma, os resultados fornecem subsídios para uma posterior ação de controle.

Similarmente, o autor em [5] decompõe o sistema elétrico em diversas áreas e, para cada área, realiza o treinamento das redes neurais do tipo *feed-forward* com a finalidade de apresentar um índice de estabilidade de tensão como resposta. A área com o menor índice é selecionada para receber ações de controle.

Através das técnicas de RNA, os autores em [6] detectam a proximidade do sistema ao ponto de colapso de maneira a alertar sobre a segurança do sistema caso alguma contingência incida sobre o mesmo.

Alguns autores aliam as capacidades adaptativas das redes neurais e os algoritmos de técnicas de otimização. Permitindo-se, desta forma, o desenvolvimento de sistemas de controle com respostas otimizadas.

A referência [7] apresenta um sistema de controle de tensão secundário descentralizado, o qual utiliza redes neurais distintas para cada fonte de potência reativa disponível no sistema. Deste modo, limita-se o efeito de distúrbios a apenas alguns elementos de controle e evita-se a necessidade de grandes quantidades de informação como parâmetros de entrada para o treinamento das redes. Estas, por sua vez, são treinadas a partir de resultados de um fluxo de potência ótimo.

Assumindo, também, um sistema de controle baseado em redes neurais treinadas a partir de resultados de um fluxo de potência ótimo, os autores em [8] desenvolvem uma estrutura de controle para aplicação direta na malha do controle de tensão primário dos geradores.

Por outro lado, em [9] os autores apresentam o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão em tempo real utilizando, também, redes neurais

artificiais, porém, baseado em informações reais da atuação dos dispositivos de controle instalados em um tronco do sistema Sul/Sudeste do SIN. Isto favorece e facilita a criação de um sistema de controle com respostas próximas as reais, uma vez que a rede neural é responsável pelo mapeamento das informações disponíveis.

Em [10] os autores combinam a atuação de controle de bancos de capacitores e reguladores de tensão para o controle de tensão em redes de distribuição através de RNA. A rede neural é treinada para quantificar a ação dos elementos de controle assumindo o propósito de minimização de perdas diante de restrições de limites de tensão.

Os autores em [11] utilizam algoritmos evolutivos, especificamente a técnica de enxame de partículas, para minimização de perdas em função das tensões de geração e da variação da compensação capacitiva em determinadas barras. Para o conjunto das melhores soluções encontradas pela otimização são traçadas as curvas PV do sistema e selecionado a resposta com a maior margem de carga como a solução de controle de tensão para o sistema.

Geralmente, as ações de controle de tensão nos sistemas elétricos, como já mencionado, são desempenhadas por operadores em tempo real. Estes atuam sobre o sistema com base no conhecimento adquirido aliado às informações de telemetria disponíveis nos centros de comando.

Uma maneira de traduzir as não-linearidades do sistema, as incertezas dos dados de telemetria e as informações qualitativas dos operadores associadas com o processo é adquirida com a utilização de sistemas baseados em lógica *fuzzy*. Há uma grande variedade de publicações que utilizam esta técnica para a solução de diversos problemas.

Em [12] e [13], os autores propõem uma abordagem de controle coordenado de tensão baseado em sistemas especialistas com a utilização de lógica *fuzzy*. As estratégias de controle são desenvolvidas a partir da experiência adquirida pelos operadores do sistema Sul/Sudeste do SIN.

Dois níveis de hierarquia de controle são assumidos para o sistema em estudo. O primeiro compreende os reguladores automáticos de tensão (AVR - *Automatic Voltage Control*) das unidades geradoras e os conjuntos de controle de tensão (JVC - *Joint Voltage Control*) das usinas. O segundo nível de controle é subdividido em dois blocos de sistemas de inferência *fuzzy* (FIS - *Fuzzy Inference System*), sendo o primeiro denominado de CFIS (*Continuous FIS*), o qual interage diretamente com os AVR's e JVC's presentes no sistema. No caso da necessidade

de maior suporte de potência reativa na área em estudo, o segundo bloco, denominado DFIS (*Discrete FIS*), é utilizado para chavear bancos de capacitores ou reatores nas subestações da área de controle.

A referência [12], ainda, aponta para a necessidade de criação de estratégias de controle que conservem o perfil de tensão da rede dentro de limites seguros de operação e mantenham uma boa reserva dinâmica de potência reativa diante dos diversos cenários. Além disso, a referência alerta que ações de controle em direções opostas em um curto intervalo de tempo devem ser evitadas a fim não criar ações conflitantes.

Com o propósito de controle de tensão em sistemas de distribuição, os autores em [14] utilizam técnicas de lógica *fuzzy* através de um controle descentralizado dos perfis de tensão em barramentos com conexão de geradores eólicos com o objetivo de evitar a desconexão dos mesmos.

O sistema *fuzzy* é aplicado, individualmente, à malha de controle do conversor eletrônico dos geradores. As funções de pertinência do sistema foram previamente definidas a critério dos autores e em seguida tiveram seus limites modificados por processo de otimização a fim de evitar variações de potência reativa fora dos limites da curva de capacidade da máquina.

A referência aponta, ainda, para as dificuldades de sistemas de controle centralizado, pois, devido à necessidade de grandes investimentos em comunicação, a implementação deste tipo de filosofia de controle na presença de grande penetração de geração distribuída torna-se financeiramente inviável.

Lidar com grandes sistemas de potência implica na necessidade de solucionar problemas de alta complexidade. No âmbito de controle de potência reativa, devido a sua característica local, o esforço exigido para a análise sistêmica torna-se um obstáculo difícil de superar.

A partição de redes para análises pontuais da interconexão entre as variáveis do sistema resulta em uma grande redução e consistência nas análises realizadas.

Em [15] os autores propõem duas técnicas para redução do sistema elétrico em análise com o intuito de reduzir o esforço computacional para traçar diagramas de bifurcação através do método da continuação.

A primeira técnica baseia-se no comportamento do vetor tangente em convergir para o autovetor à direita do autovalor crítico no ponto de bifurcação. Desta forma, os elementos com maiores magnitudes do autovetor a direita indica a área crítica e as barras mais afetadas pela bifurcação. Disto, os elementos com

magnitudes pequenas e, portanto, pouca influência na bifurcação, são eliminados do processo computacional.

A segunda técnica de redução da rede utiliza a informação do vetor tangente para indicar a barra crítica do sistema. A partir disso, a primeira vizinhança da barra crítica é considerada para formação da área crítica inicial. Outras barras vizinhas à área crítica podem ser inseridas dependendo de alguns critérios da metodologia. Por fim, define-se uma área de estudo ao redor da barra crítica do sistema.

Como exposto anteriormente, a redução do sistema favorece e simplifica as análises necessárias para entendimento do mesmo. Frente esta mesma filosofia criou-se o conceito de barra piloto. As barras selecionadas como barra piloto são barras de carga cujas informações são suficientes para representar o perfil de tensão do sistema [16] e [17].

Uma alternativa ao controle de tensão através da barra piloto é a criação de uma barra fictícia localizada em um ponto de interesse no sistema, a qual deve ser considerada para controle.

Isto pode ser encontrado na referência [18], onde se utiliza como foco o controle secundário de tensão de forma descentralizada. Para isto, os autores empregam o uso de um conjunto de controle de tensão (JVC – *Joint Voltage Control*) e um conjunto de compensador por queda de tensão na linha (JLDC - *Joint line drop compensation*). A tensão da barra fictícia é inferida através da utilização de uma impedância pré-estabelecida. Possui a vantagem de não necessitar de recursos de comunicação entre diferentes usinas do sistema para efetuar o controle de tensão.

A análise estática da estabilidade de tensão de um sistema utiliza-se do fato das equações diferenciais, que regem um sistema elétrico, reduzirem-se para simples equações algébricas nos pontos de operação do mesmo. Disto, diversas técnicas de análise surgiram a fim de mensurar a segurança operativa sob o ponto de vista de tensão [19].

A técnica de análise modal proporciona grandes vantagens, uma vez que apresenta informações de estabilidade de tensão sob uma visão sistêmica, além de indicar áreas distintas com potenciais problemas de tensão.

Segundo apresentado em [20], a análise dos autovetores referentes aos menores autovalores do sistema fornece uma noção das áreas mais susceptíveis a problemas de tensão devido à falta de potência reativa. Além disso, a análise dos fatores de participação dos geradores indica quais destes sofrem maiores variações na geração de potência reativa devido a perturbações na carga da área.

Portanto, a análise modal sugere quais geradores devem manter reservas de potência reativa com o propósito de preservar a margem de estabilidade no caso da necessidade de efetuar ações de controle no sistema.

Os autores em [21] utilizam os conceitos estabelecidos anteriormente pela análise modal e introduzem o fator de participação de potência ativa através da redução das equações da jacobiana de fluxo em um conjunto de equações algébricas que relacionam potência ativa e variação angular. Por fim, utilizam as informações obtidas pelos fatores para realizar redespachos de potência ativa e reativa no sistema para melhoria da margem de estabilidade.

Ainda no âmbito da margem de estabilidade de tensão, os autores em [22] comparam a utilização de fatores de sensibilidade e fatores de participação na identificação de áreas deficientes em potência reativa para monitoramento e controle on-line da estabilidade de tensão.

Em função de variação de carga ou na presença de contingências em um sistema elétrico qualquer, o controle de potência reativa atua como uma ferramenta auxiliar para manutenção do perfil de tensão do sistema e obtenção de uma maior margem de carga.

No entanto, segundo [23] a parcela de mercado para a potência reativa atinge valores da ordem de 1% devido à mesma ser encarada como um serviço ancilar do sistema. Porém, os autores questionam este fato indicando que o controle de potência reativa deve ser tratado como uma questão de segurança do sistema. Para tanto, os elementos de controle, envolvidos na geração de potência reativa, devem ser compensados financeiramente.

Os autores em [24] reforçam a ideia de precificação da potência reativa devido à manutenção a segurança operativa do sistema. Os resultados obtidos no trabalho mostram que há um aumento no custo de geração quando os requisitos de estabilidade de tensão são incorporados ao fluxo de potência ótimo.

Ainda com enfoque no mercado de energia, a referência [25] utiliza um algoritmo composto por quatro estágios de otimização com a proposta de atender requisitos técnicos e econômicos, tais como reserva de potência reativa, margem de estabilidade e custos com perdas.

Como já mencionado, manter reservas de potência reativa dispostas nas áreas mais críticas é imprescindível à operação segura de um sistema sob o ponto de vista de estabilidade de tensão. Porém, pouca atenção é dada na utilização deste tipo de informação no planejamento da operação do sistema.

Em [26] e [27] os autores apresentam uma metodologia de planejamento de operação que incorpora aspectos técnicos da estabilidade de tensão como variáveis do problema de pré-despacho do sistema de potência.

A solução do problema utiliza inicialmente métodos de fluxo de potência ótimo para definir um planejamento de despacho inicial. Posteriormente, utiliza-se de fatores de participação de potência ativa (APF), da análise modal, para determinar os geradores que devem participar do redespacho de potência reativa. Pela análise do APF, os geradores com índices menores são designados com fatores de penalização negativos e os demais com fatores positivos. Por fim estes são incorporados à função objetivo de minimização de custo de geração do fluxo de potência ótimo com o intuito de melhorar a margem de carga do sistema.

Uma abordagem parecida é apresentada em [28] e [29]. Porém, os autores consideram tanto o redespacho de potência reativa quanto o de potência ativa para cumprimento das especificações de estabilidade de tensão. Isto sem a preocupação com o grande impacto no mercado de potência ativa.

## **1.2 Motivação e Objetivo**

A operação e controle de tensão dos sistemas de potência são, atualmente, realizados com base em manuais de operação e no conhecimento adquirido pelos operadores. No entanto, diante de eventuais contingências e cenários cada vez mais complexos e carregados, o sistema pode vir a operar próximo ao ponto de máximo carregamento e, em decorrência de ações de controle subjugadas, atingir o colapso de tensão devido à falta de suporte de potência reativa nas áreas críticas do sistema.

Ao mesmo tempo, o controle de tensão convencional com objetivo de manter a tensão dentro de limites operativos aumenta a possibilidade de detrimento da segurança operativa do sistema. Ante deste aspecto, esquemas de controle com considerações técnicas de margem de estabilidade são bem vindos.

Como apresentado, diversas publicações encontradas na literatura abordam o problema de controle de potência reativa através de técnicas de otimização ou redes neurais artificiais. Entretanto, estas metodologias exigem um alto custo computacional. No caso das redes neurais, este custo agrava-se pela necessidade de disposição de um extenso banco de dados para treinamento da rede.



Metodologias que apoiam-se em informações qualitativas extraídas da experiência dos operadores frente a um sistema específico são muito válidas. Isto contribui para soluções práticas e eficientes. Porém, para um sistema desconhecido, abordagens deste tipo são impossibilitadas. Além do mais, estas carecem de informações concisas sobre estabilidade de tensão.

Conforme exposto, métodos de controle coordenado de tensão de forma centralizada exigem análises complexas e, além disso, necessitam de grandes sistemas de comunicação entre os agentes envolvidos nos controles.

Portanto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para o desenvolvimento de um sistema de controle de tensão secundário descentralizado, o qual será desenvolvido pautado sobre considerações técnicas de limites de tensão e estabilidade de tensão.

Para tanto, utiliza-se ferramentas de análise modal para determinação de áreas de controle e identificação das interações entre os elementos de controle e os barramentos de carga. Por fim, estas informações são traduzidas em um sistema de controle por lógica *fuzzy* responsável por indicar a atuação dos controladores para cada subárea do sistema.

### **1.3 Organização da Dissertação**

A organização do trabalho é realizada da seguinte forma. No presente capítulo é apresentada uma introdução ao tema de controle de tensão. Em seguida é realizada uma revisão literária sobre diversas publicações vinculadas ao tema.

O capítulo 2 apresenta a técnica de análise modal para identificação de áreas de controle e definição de barras piloto. Também é discutida a participação dos barramentos de geração e carga nos modos de controle mais críticos.

O capítulo 3 apresenta a teoria de conjuntos *fuzzy* com foco no desenvolvimento de sistemas de controle *fuzzy* para aplicação sobre processos.

O capítulo 4 introduz a proposta central deste trabalho, assim como a metodologia utilizada no desenvolvimento do sistema de controle *fuzzy* de tensão com base nos fundamentos teóricos apresentados nos capítulos precedentes deste.

Os resultados e discussões obtidos com a aplicação da metodologia sobre o sistema IEEE 118 são apresentados no capítulo 5.

Finalmente, o capítulo 6 destina-se a apresentar as considerações finais do trabalho, além das sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### 2 ÁREAS DE CONTROLE POR ANÁLISE MODAL

A estabilidade de tensão de um sistema elétrico está intimamente relacionada com a capacidade do mesmo em manter tensões aceitáveis em todas as barras em condições normais de operação e após a ocorrência de perturbações. Conforme diversas publicações evidenciam, o principal fator responsável pela instabilidade de tensão é a inabilidade do sistema em suprir a demanda de potência reativa necessária [19].

Apesar da instabilidade de tensão ser um fenômeno essencialmente local, em função da impossibilidade de transmissão de potência reativa por grandes distâncias, as suas consequências são propagadas em todo o sistema. Por sua vez, uma sequência de eventos acompanhados de instabilidade de tensão, o qual leva o sistema a um baixo e inaceitável perfil de tensão em todo o sistema é denominado de Colapso de Tensão pela literatura [19] e [30].

A capacidade de um sistema elétrico em manter uma operação estável após grandes contingências ou aumento de carga é comumente relacionado com o termo Segurança de Tensão. Isto implica na existência de uma margem considerável entre o ponto de operação e o ponto de instabilidade de tensão [30].

A estabilidade de tensão é um processo dinâmico e pode ser estudado através de extensivas simulações de análise transitória. Entretanto, análises deste tipo exigem simulações demoradas e não fornecem, rapidamente, informações quanto à sensibilidade ou nível de estabilidade do sistema. Ademais, a dinâmica que influencia a estabilidade de tensão é lenta. Estes aspectos favorecem a utilização de métodos estáticos de análise para obtenção de informações rápidas e efetivas sobre o sistema [19], [20] e [30].

Sob o ponto de vista de controle de tensão, o sistema de potência pode ser segmentado em vários níveis hierárquicos com o propósito de atender múltiplos objetivos. Ao conjunto destes níveis é dado, na literatura, o nome de Controle Coordenado de Tensão (CCT).

O nível hierárquico responsável por manter as tensões dos equipamentos de controle próximas dos valores nominais e, desta forma, maximizar a utilização do

sistema de transmissão para permitir o aumento da estabilidade do sistema é chamado de Controle Secundário de Tensão (CST). Este corresponde ao segundo nível na hierarquia do CCT e trata-se de um controle regional, o qual é realizado objetivando manter um perfil de tensão adequado em uma barra representativa, ou barra piloto, de uma área [19], [31], [32], [33] e [34].

Diante destes aspectos, a identificação das áreas de controle e respectivas barras piloto que façam parte de um CST deve ser fundamentada em análises criteriosas a fim de cumprir com considerações de estabilidade de tensão e operar de forma eficiente e confiável.

Conforme já mencionado, as análises estáticas fornecem métodos de identificação de áreas de controle de tensão.

Neste capítulo são apresentados, inicialmente, os fundamentos da formulação do fluxo de potência e os conceitos da análise modal [1], [19] e [34]. Posteriormente é apresentado o método de definição de áreas de controle por análise modal proposto por [34]. Todos estes conceitos constituem parte da metodologia central deste trabalho.

## 2.1 Formulação do Problema de Fluxo de Potência

A formulação tradicional do problema de fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson descreve o sistema de equações linearizadas que relaciona as variações de módulo de tensão e de ângulo com as variações de potência ativa e reativa. Para isto, as barras tidas como do tipo PV contribuem com uma equação e uma variável de estado e as barras do tipo PQ contribuem com duas equações e duas variáveis de estado.

Logo, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

onde:

- $\Delta P$  → Representa o vetor de erros das equações de potência ativa;
- $\Delta Q$  → Representa o vetor de erros das equações de potência reativa;
- $\Delta \theta$  → Representa o vetor de variação angular das tensões nas barras;

- $\Delta V \rightarrow$  Representa o vetor de variações da magnitude das tensões;
- $H, N, M, L \rightarrow$  Submatrizes que compõem a matriz Jacobiana de fluxo ( $J_{ca}$ );

Quanto a matriz jacobiana, pode-se escrever:

$$[J_{ca}] = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

No entanto, uma formulação mais flexível pode ser obtida com a inclusão das equações que descrevem a ação dos dispositivos de controle à formulação tradicional de fluxo de potência. Com isto, para cada equação adicionada necessita-se acrescentar uma variável de estado associada para manter o sistema possível e determinado [1] e [34]. Logo, tem-se em (2.3):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial V} & \frac{\partial y}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta x \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

onde:

$$\Delta P = P^{esp} - P^{cal} \quad (2.4)$$

$$P^{esp} = P_G - P_L \quad (2.5)$$

$$\Delta Q = Q^{esp} - Q^{cal} \quad (2.6)$$

$$Q^{esp} = Q_G - Q_L \quad (2.7)$$

$$\Delta y = y^{esp} - y^{cal} \quad (2.8)$$

$$y^{cal} = f(\theta, V, x) \quad (2.9)$$

No conjunto de equações acima, a equação (2.8) representa o vetor de erros das equações adicionais que modelam os equipamentos de controle. Já o vetor  $\Delta x$ , presente na equação (2.3), é formado pelo incremento das variáveis de estado

incorporadas ao problema, que, conforme mencionado, é responsável por tornar o sistema de equações possível e determinado.

Segundo apresenta-se em [1], a equação (2.3) pode ser reescrita de maneira a evidenciar as submatrizes do problema conforme a equação (2.10):

$$\begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{ca} & J_{vx} \\ J_{yu} & J_{yx} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta x \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Da equação (2.10),  $J_{ca}$  representa a matriz jacobiana da formulação tradicional do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson. A matriz  $J_{vx}$  é uma matriz não quadrada que representa as derivadas parciais das equações de potência ativa e reativa em relação às novas variáveis de estado acrescentadas. Quanto as matrizes  $J_{yu}$  e  $J_{yx}$  são as derivadas parciais das novas equações adicionadas, representativas dos elementos de controle, em relação às variáveis de estado do problema original e as adicionais, respectivamente. Estas quatro matrizes, por sua vez, compõem o conjunto de submatrizes da matriz denominada Jacobiana Expandida [1] e [34], apresentada na equação (2.11):

$$J = \begin{bmatrix} J_{ca} & J_{vx} \\ J_{yu} & J_{yx} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

A utilização da modelagem expandida da matriz permite a incorporação de diversos tipos de elementos de controle no problema de fluxo de potência tradicional [1], [34] e [35], tais como:

- Controle de tensão em barras PV;
- Limites de tensão em barras PQ;
- Transformadores com *Tap* variável;
- Controle de intercâmbio entre áreas;
- Controle remoto de tensão (CRT);
- Controle secundário de tensão (CST);
- Capacitor série controlável (CSC);
- Compensador estático de reativo (CER);
- Chaveamento automático de elementos *shunt*;

Desta forma, a utilização da modelagem expandida da matriz Jacobiana possui, como grande vantagem, a flexibilidade na incorporação e retirada das equações que modelam os equipamentos de controle, uma vez que a matriz Jacobiana da formulação tradicional é preservada. Isto favorece, também, a aplicação em programas computacionais já estabelecidos no mercado, [1] e [34].

Ademais, desperta a possibilidade de incorporação das equações de potência reativa das barras do tipo PV, compostas por geradores e/ou compensadores síncronos. Estas são tradicionalmente eliminadas da formulação da Jacobiana tradicional e, conforme será abordado nos itens a seguir, impossibilitam a determinação dos fatores de sensibilidade de potência reativa entre as barras de carga e geração por análise modal.

Para uma barra  $k$  do tipo PV controlando a própria tensão, adiciona-se a variável,  $Q_{Gk}$ , referente à geração de potência reativa da barra  $k$  como nova variável de estado do problema. Disto, tem-se em (2.12):

$$\Delta x = \Delta Q_{Gk} \quad (2.12)$$

Como a barra controlará a própria tensão, tem-se o resíduo para a equação de controle  $\Delta y$ :

$$\Delta y = V_k^{esp} - V_k^{cal} \quad (2.13)$$

É importante notar ainda, que como a variável  $Q_{Gk}$  foi considerada para o problema, a equação referente a variação da potência reativa da barra  $k$  deve ser reinserida na formulação do fluxo de carga. Disto tem-se:

$$\Delta Q'_k = Q_k^{esp} - Q_k^{cal} = (Q_G + Q_{Gk} - Q_L) - Q_k^{cal} \quad (2.14)$$

Deste modo, um exemplo da matriz jacobiana expandida para representação de barras PV pode ser visualizada na equação (2.15). Nesta equação, a submatriz  $J_{vx}$  é um vetor coluna onde somente o elemento da linha referente à equação de potência reativa da barra  $k$  é não nulo. Quanto à submatriz  $J_{yu}$ , esta é um vetor linha com elementos nulos, exceto na coluna referente à tensão  $V_k$ . Já a submatriz  $J_{yx}$  é composta somente por elementos nulos.

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q'_k \\ \vdots \\ \Delta y \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \vdots & 0 & \cdots \\ \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \vdots & 1 & \cdots \\ \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots \\ \cdots & 0 & 1 & \vdots & 0 & \cdots \\ \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta x \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

De maneira análoga é possível utilizar a formulação da Jacobiana expandida apresentada na equação (2.15) para representar o controle de tensão da barra *swing*. Assim, com a permanência das equações de erro de potência reativa das barras de geração do sistema, os fatores de sensibilidade referentes a estas barras estarão presentes na matriz jacobiana. Isto será fundamental para a determinação de áreas de controle a partir da análise modal, considerado nos itens a seguir.

## 2.2 Análise Modal

Usualmente, a análise da estabilidade de tensão de um sistema é realizada pela análise de diversas curvas PV e QV de barras selecionadas. Isto exige a execução de inúmeros fluxos de potência, o que representa um grande dispêndio de tempo e demanda muito cuidado na escolha das barras a serem analisadas para evitar conclusões distorcidas [19].

Conforme mencionado na revisão literária (Capítulo 1) há diversas técnicas para análise estática da estabilidade de tensão que contornam a necessidade de execução de muitos fluxos de potência. A análise modal, [19] e [20], é uma destas técnicas e apresenta a grande vantagem de mostrar informações relacionadas com a estabilidade de tensão sob uma visão sistêmica.

Por outro aspecto, a análise modal permite, ainda, a definição de áreas de controle de tensão, como apresentado em [34].

### 2.2.1 Autovalores

Os autovalores de uma matriz partem da determinação das raízes que satisfazem o conjunto de equações representado por (2.16), considerando-se soluções não-triviais:

$$\mathbf{A} \cdot \phi = \lambda \cdot \phi \quad (2.16)$$

onde  $\mathbf{A}$  é uma matriz ( $n \times n$ ),  $\phi$  é um vetor coluna de ordem ( $n \times 1$ ) e  $\lambda$  é um escalar.

A equação (2.16) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$(\mathbf{A} - \lambda \cdot \mathbf{I}) \cdot \phi = 0 \quad (2.17)$$

onde  $\mathbf{I}$  é uma matriz identidade de ordem ( $n \times n$ ).

Segundo [36], existe uma solução não-trivial, ou seja  $\phi \neq 0$ , para a equação (2.16) se, e somente se, a matriz  $(\mathbf{A} - \lambda \cdot \mathbf{I})$  for singular. Isto é:

$$\det(\mathbf{A} - \lambda \cdot \mathbf{I}) = 0 \quad (2.18)$$

A partir do determinante na equação (2.18) obtém-se uma equação polinomial de ordem  $n$  denominada de *Equação Característica* da matriz  $\mathbf{A}$ . Para as  $n$  raízes da equação característica, isto é  $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , são dados o nome de *Autovalores* da matriz  $\mathbf{A}$ .

Os autovalores podem ser reais ou complexos. Caso a matriz  $\mathbf{A}$  seja real, os autovalores complexos sempre apareceram em pares conjugados. No entanto, caso a matriz  $\mathbf{A}$  seja real e simétrica, todos os autovalores e autovetores serão reais, [1], [19] e [34].

### 2.2.2 Autovetores

Para qualquer autovalor  $\lambda_i$ , o conjunto de equações em (2.16) possui no mínimo uma solução não-trivial  $\phi_i$ . A esta solução é dado o nome de *Autovetor à direita* de  $\mathbf{A}$ . Logo:

$$\mathbf{A} \cdot \phi_i = \lambda_i \cdot \phi_i \quad (2.19)$$

sendo  $i = 1, 2, \dots, n$ .



Similarmente, para qualquer autovalor  $\lambda_i$  o vetor linha,  $\Psi_i$ , de ordem  $(1 \times n)$  que satisfaz a equação (2.20) é denominado como *Autovetor à esquerda*.

$$\Psi_i \cdot \mathbf{A} = \lambda_i \cdot \Psi_i \quad (2.20)$$

sendo  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Os autovetores à esquerda e a direita correspondentes a autovalores distintos são ortogonais. Ou seja:

$$\Psi_j \cdot \phi_i = 0 \quad (2.21)$$

No entanto, para autovetores correspondentes ao mesmo autovalor, tem-se:

$$\Psi_i \cdot \phi_i = C_i \quad (2.22)$$

onde  $C_i$  é uma constante não nula.

Usualmente, os autovetores a direita e à esquerda são normalizados e desta forma, tem-se que a multiplicação destes autovetores, associados a um mesmo autovalor, resulta em um valor unitário.

$$\Psi_i \cdot \phi_i = 1 \quad (2.23)$$

### 2.2.3 Propriedades dos autovalores e autovetores

A partir da definição de autovalores e autovetores realizada, anteriormente, através da equação (2.16), pode-se escrever:

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{\Phi} = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_n] \quad (2.25)$$

$$\mathbf{\Psi} = [\psi_1^T \ \psi_2^T \ \dots \ \psi_n^T]^T \quad (2.26)$$

onde  $\mathbf{\Lambda}$  é a matriz de dimensão  $(n \times n)$  composta pelos  $n$  autovalores da matriz  $\mathbf{A}$  dispostos nos elementos da diagonal principal.

Através da generalização da equação (2.19) e das equações (2.24), (2.25) e (2.26), pode-se escrever as seguintes relações:

$$\mathbf{A} \cdot \Phi = \Phi \cdot \Lambda \quad (2.27)$$

$$\Psi \cdot \Phi = \mathbf{I} \quad (2.28)$$

$$\Psi = \Phi^{-1} \quad (2.29)$$

Disto, tem-se:

$$\Phi^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \Phi = \Lambda \quad (2.30)$$

A finalidade do desenvolvimento da equação (2.30) está na possibilidade de desacoplamento entre as variáveis de estado do problema. Por exemplo, dado um sistema de equações diferenciais genérico em (2.31):

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{x} \quad (2.31)$$

A variação de uma variável de estado qualquer deste sistema é representada por uma combinação linear de todas as variáveis de estado. Desta forma, torna-se muito difícil isolar os parâmetros que mais influenciam cada modo de oscilação do sistema.

Uma forma de eliminar este acoplamento entre as variáveis de estado é considerar um novo vetor de incógnitas que possua relação com o vetor das variáveis de estado original. Logo:

$$\Delta \mathbf{x} = \Phi \cdot \mathbf{z} \quad (2.32)$$

$$\mathbf{z} = \Psi \cdot \Delta \mathbf{x} \quad (2.33)$$

Substituindo a equação (2.32) em (2.31), tem-se:

$$\Phi \cdot \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A} \cdot \Phi \cdot \mathbf{z} \quad (2.34)$$

Assim, a nova equação de estados pode ser escrita como:

$$\dot{z} = \Phi^{-1} \cdot A \cdot \Phi \cdot z \quad (2.35)$$

Com base na equação (2.30), a equação (2.35) pode ser reescrita como:

$$\dot{z} = \Lambda \cdot z \quad (2.36)$$

Observa-se, através da equação (2.36) desenvolvida, que o sistema de equações está totalmente desacoplado, uma vez que a matriz de autovalores  $\Lambda$  é uma matriz diagonal. Isto facilita a análise do problema.

#### 2.2.4 Características do *Mode-Shape*

Dado o desacoplamento adquirido através da equação (2.36) com a utilização da variável  $z$ , a equação (2.32) apresenta uma relação direta entre o vetor de variáveis de estado original  $x$  e o vetor de variáveis de estado transformado  $z$ . Observa-se, ainda, que esta relação é realizada pelo autovetor à direita da matriz  $A$ .

Portanto, a análise do autovetor à direita torna possível a verificação do comportamento isolado de todas as variáveis de estado quando um determinado modo é perturbado.

De forma análoga, a análise da equação (2.33), verifica-se que o autovetor à esquerda da matriz  $A$  mostra o comportamento da variável de estado transformada  $z$  quando uma variável de estado  $x$  é perturbada.

Segundo [1] e [34], a visualização gráfica do diagrama formado pela amplitude e fase do elemento  $\Phi_{ki}$  da matriz de autovetores à direita, relacionado a um modo  $i$ , quando é analisado um mesmo tipo de variável de saída é denominada, comumente, de *Mode-Shape*.

### 2.3 Áreas de Controle pelo *Mode-Shape*

Conforme estabelecido anteriormente, o sistema de equações em (2.2), onde considerou-se os elementos de controle na formulação da jacobiana, permite capturar as sensibilidades das barras PQ em relação as barras PV sob o ponto de vista de potência reativa. Isto é fundamental para a determinação das áreas de controle [34].

Se abandonarmos as equações de controle  $\Delta y$  em (2.3), o sistema linear passa a ter a forma apresentada na equação (2.37):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Disto, tem-se que a matriz  $J_{P\theta}$  representa a derivada parcial das equações de potência ativa em relação à variável de estado  $\theta$  para as barras PV e PQ. A matriz  $J_{PV}$  representa a derivada parcial das equações de potência ativa em relação à variável de estado  $V$  para todas as barras do sistema. Por sua vez, a matrizes  $J_{Q\theta}$  representa a derivada parcial das equações de potência reativa em relação à variável de estado  $\theta$  das barras PV e PQ. Finalmente, a matriz  $J_{QV}$  representa a derivada parcial das equações de potência reativa em relação à variável de estado  $V$  das barras PV, PQ e *Swing*.

Com o objetivo de verificar a sensibilidade das barras do sistema em relação a variação de potência reativa, supõe-se a inexistência de variação nas demandas de potência ativa, ou seja,  $\Delta P = 0$  em (2.37). Assim, torna-se possível a redução do sistema de equações conforme é apresentado a seguir:

$$[0] = J_{P\theta} \cdot \Delta\theta + J_{PV} \cdot \Delta V \quad (2.38)$$

$$J_{P\theta} \cdot \Delta\theta = -J_{PV} \cdot \Delta V \quad (2.39)$$

$$\Delta\theta = (-J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV}) \cdot \Delta V \quad (2.40)$$

Deste modo, substituindo a equação (2.40) no conjunto de equações de potência reativa em (2.37), obtém-se que:

$$\Delta Q = J_{Q\theta} \cdot \Delta\theta + J_{QV} \cdot \Delta V \quad (2.41)$$

$$\Delta Q = J_{Q\theta} \cdot (-J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV}) \cdot \Delta V + J_{QV} \cdot \Delta V \quad (2.42)$$

$$\Delta Q = (J_{QV} + J_{Q\theta} \cdot -J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV}) \cdot \Delta V \quad (2.43)$$

Assim, define a matriz de sensibilidade  $QV$  denominada de  $J_{SQV}$ :

$$J_{SQV} = J_{QV} + J_{Q\theta} \cdot -J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV} \quad (2.44)$$

Segundo é apresentado em [19] e [34], para uma análise de sensibilidade tradicional sob a matriz  $J_{sqv}$ , a partir da diagonalização desta matriz pela transformação por similaridade, mostrada na equação (2.35), a sensibilidade da variável de estado de tensão em relação ao erro da equação de potência reativa é obtida pela combinação linear de todos os autovalores e respectivos elementos dos autovetores da matriz  $J_{sqv}$ .

Ainda, segundo [34], se os autovalores da matriz  $J_{sqv}$  forem dispostos em ordem crescente do valor de seus módulos e o primeiro autovalor,  $\lambda_1$ , for sensivelmente menor que os demais autovalores, a sensibilidade da variável de estado  $V_k$  em relação ao erro da equação de potência reativa  $Q_k$  pode ser estimada apenas com o autovalor de menor módulo. Disto:

$$\frac{\partial V_k}{\partial Q_k} = \sum_{i=1}^n \frac{(\phi_{ki} \cdot \psi_{ik})}{\lambda_i} \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial V_k}{\partial Q_k} \approx \frac{(\phi_{k1} \cdot \psi_{1k})}{\lambda_1} \quad (2.46)$$

onde  $k$  é o número da barra para qual a sensibilidade está sendo calculada.

Porém, como evidencia a equação (2.45), a análise de sensibilidade deve ser realizada barra por barra. Com isto, para sistemas compostos por um grande número de barramentos esta metodologia demanda um grande esforço.

Portanto, um método de análise através de *mode-shapes* é introduzido por [34] para a definição de áreas de controle sem a necessidade de uma análise minuciosa, barra por barra.

Baseado na equação (2.45) é possível afirmar que duas ou mais barras pertencem a uma mesma área se todos os seus fatores de sensibilidade forem semelhantes.

Assumindo a transformação de similaridade para a matriz  $J_{sqv}$ , tem-se:

$$J_{SQV} = \Phi \cdot \Lambda \cdot \Psi \quad (2.47)$$

$$J_{SQV}^{-1} = \Phi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \Psi \quad (2.48)$$

Assim, pode-se escrever a partir de (2.43), (2.44) e (2.48):

$$\Delta V = \Phi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \Psi \cdot \Delta Q \quad (2.49)$$

Analogamente ao realizado na análise de sensibilidade em (2.46), pode-se reescrever a equação (2.49) assumindo-se somente o menor autovalor da matriz  $J_{sqv}$  como o representativo da equação. Se este autovalor for considerado como o primeiro autovalor, tem-se:

$$\Delta V \approx \frac{(\phi_1, \psi_1)}{\lambda_1} \cdot \Delta Q \quad (2.50)$$

onde,  $\phi_1$  é um vetor coluna ( $n \times 1$ ) sendo o  $k$ -ésimo elemento associado a barra  $k$  do sistema e  $\psi_1$  é um vetor linha ( $1 \times n$ ) em que o  $m$ -ésimo elemento está associado a barra  $m$  do sistema, ambos associados ao menor autovalor do sistema,  $\lambda_1$ .

A equação (2.50), por sua vez, pode ser reescrita da forma matricial com auxílio das equações (2.24), (2.25) e (2.26):

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} \approx \begin{bmatrix} \phi_{11} \cdot \frac{\psi_{11}}{\lambda_1} & \phi_{11} \cdot \frac{\psi_{12}}{\lambda_1} & \dots & \phi_{11} \cdot \frac{\psi_{1n}}{\lambda_1} \\ \phi_{21} \cdot \frac{\psi_{11}}{\lambda_1} & \phi_{21} \cdot \frac{\psi_{12}}{\lambda_1} & \dots & \phi_{21} \cdot \frac{\psi_{1n}}{\lambda_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n1} \cdot \frac{\psi_{11}}{\lambda_1} & \phi_{n1} \cdot \frac{\psi_{12}}{\lambda_1} & \dots & \phi_{n1} \cdot \frac{\psi_{1n}}{\lambda_1} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

Observa-se em (2.51) que as linhas da matriz apresentam a sensibilidade de tensão de uma barra  $k$  qualquer em relação às injeções de potência reativa em todas as barras. Por outro lado, as colunas da matriz representam a sensibilidade das tensões de todas as barras em relação à injeção de potência reativa em uma barra  $m$  qualquer.

Verifica-se em (2.51), após uma análise cuidadosa, que as linhas da matriz são formadas por elementos idênticos, sendo cada linha multiplicada pelo respectivo autovetor à direita. Isto fica evidenciado na equação (2.52).

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} \approx \phi_1 \cdot \frac{1}{\lambda_1} \cdot \psi_1 \approx \begin{bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \vdots \\ \phi_{n1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\psi_{11}}{\lambda_1} & \frac{\psi_{12}}{\lambda_1} & \dots & \frac{\psi_{1n}}{\lambda_1} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Como a matriz  $J_{sqv}$  é formada a partir da matriz jacobiana estendida e, conforme já mencionado, esta é uma matriz simétrica e real, logo todos os

autovalores e autovetores da matriz jacobiana estendida serão reais, bem como para a matriz  $J_{sqv}$ . Disto, se todos os autovalores e autovetores da matriz  $J_{sqv}$  são reais, então as linhas da matriz em (2.51) são colineares.

### 2.3.1 Seleção de áreas de controle

Estabelece-se assim, que as linhas da matriz em (2.51) que forem multiplicados por elementos positivos do autovetor à direita formam o primeiro grupo de barras agrupadas através da análise do autovalor  $\lambda_1$ . Por conseguinte, as linhas multiplicadas por elementos negativos do autovetor à direita formam o segundo grupo de barras agrupadas. Além disso, utiliza-se um módulo mínimo necessário para que uma barra seja adicionada em alguma área, evitando-se assim que barras com pouca influência no modo analisado participem da área.

Portanto, para cada autovalor são estabelecidas duas áreas de controle distintas. Porém, a determinação de áreas pode ser realizada com dois ou mais autovalores, desde que sejam estabelecidos alguns critérios para o agrupamento. Assim, define-se que em um novo autovalor analisado,  $\lambda_2$ , se este contiver barras que foram agrupadas previamente pelo primeiro autovalor em um grupo A, as barras do autovalor  $\lambda_2$  que possuírem módulos superiores ao mínimo estabelecido serão adicionadas ao Grupo A [34].

Um exemplo de seleção de áreas de controle pode ser visualizado pelas figuras 1, 2 e 3. Supondo a definição de áreas para o sistema acadêmico IEEE14 através da metodologia proposta em [34] e discutida aqui, têm-se na Tabela 2.1 os valores dos módulos dos três menores autovalores da matriz  $J_{sqv}$ .

Tabela 2.1 - Autovalores de  $J_{sqv}$  em ordem crescente para o sistema IEEE14

<b>Autovalores de <math>J_{sqv}</math></b>	<b>Módulo</b>
$\lambda_1$	0,1424
$\lambda_2$	2,1733
$\lambda_3$	3,0474

Observa-se que para o sistema considerado, o menor autovalor,  $\lambda_1$ , possui um módulo pequeno se comparado com os demais. A Figura 2.1 apresenta o *mode-shape* do autovalor  $\lambda_1$ .

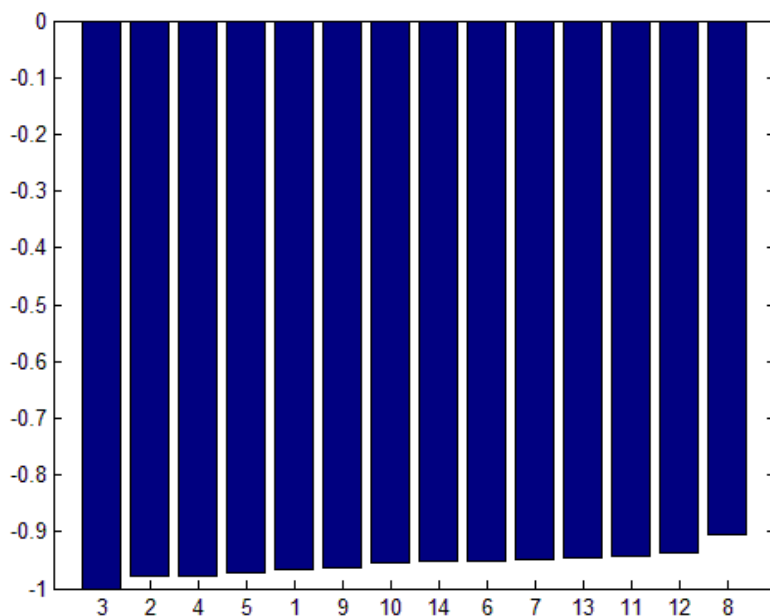


Figura 2.1 - *Mode-shape* do autovalor  $\lambda_1$  para o sistema IEEE14

Verifica-se para este *mode-shape* que todas as barras do sistema possuem módulos semelhantes e sentidos iguais. Isto indica um acoplamento entre as barras, o qual é justificado em função da inclusão das equações de potência reativa das barras PV e *swing* na formulação da matriz jacobiana. Com isto, tem-se um grupo de equações que se tornam próximas de serem linearmente dependentes.

A Figura 2.2 e a Figura 2.3, a seguir, apresentam os *mode-shapes* para os autovalores  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$  da matriz  $J_{sqv}$  considerando-se o módulo mínimo de 0,4.

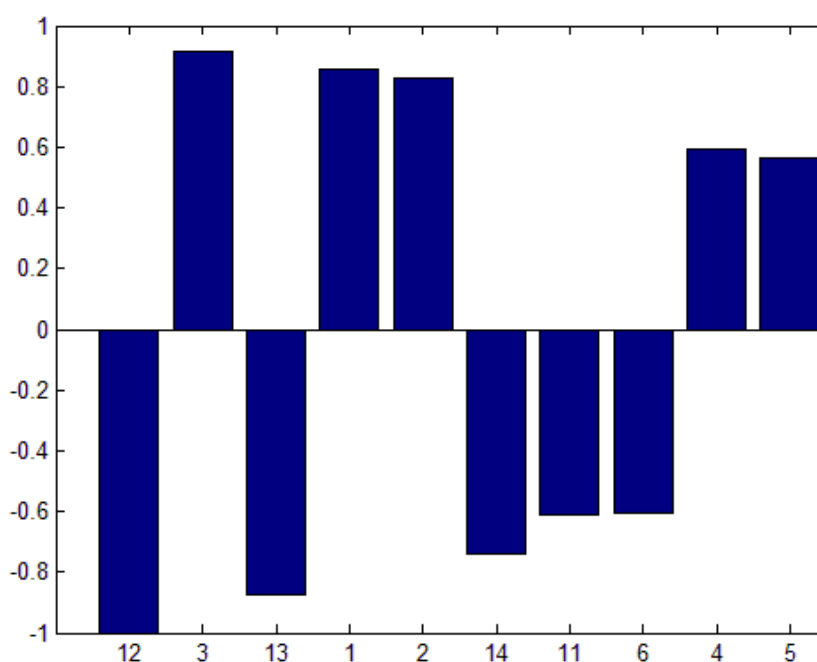


Figura 2.2 - *Mode-shape* do autovalor  $\lambda_2$  para o sistema IEEE14



Observando o *mode-shape* do autovalor  $\lambda_2$  dado pela Figura 2.2, verifica-se que o sistema pode ser dividido em dois grupos. Sendo um composto pelas barras 12, 13, 14, 11 e 6, e outro grupo formado pelas barras 3, 1, 2, 4, 5. Verifica-se, ainda, a ausência das barras 8, 7 e 9, os quais não foram apresentados nos gráficos devido ao módulo destes elementos serem menores que o módulo mínimo estabelecido.

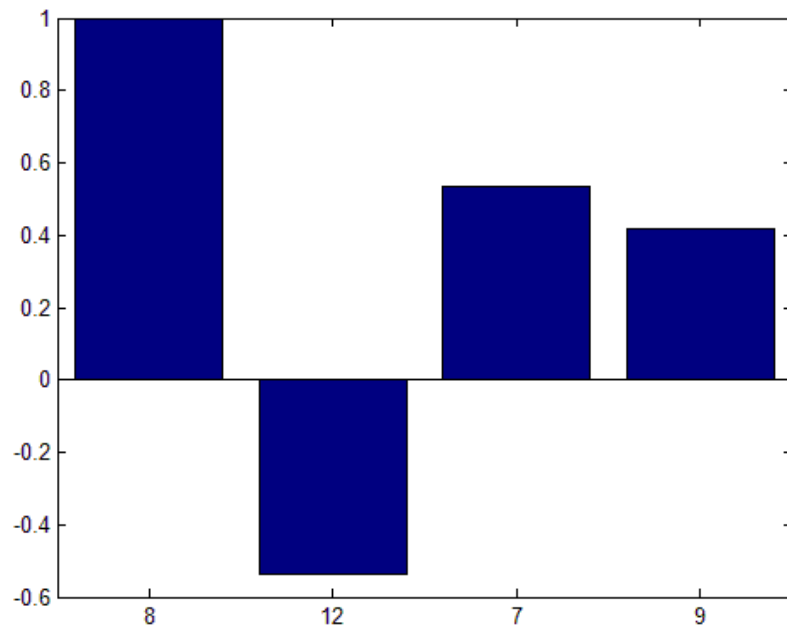


Figura 2.3 - *Mode-shape* do autovalor  $\lambda_3$  para o sistema IEEE14

No entanto, a análise do *mode-shape* do autovalor  $\lambda_3$  do sistema dado pela Figura 2.3 revela um terceiro grupo de barras de controle, uma vez que estes não aparecem vinculados com nenhum dos outros dois grupos já definidos. Logo, definem-se as barras 8, 7 e 9 como um terceiro grupo. A Tabela 2.2 resume as áreas estabelecidas pela análise dos três menores autovalores do sistema IEEE14.

Tabela 2.2 - Áreas de controle definidas pelos autovalores de  $J_{sqv}$ .

Áreas	Barras PQ	Barras PV
<b>A</b>	12, 13, 14, 11	6
<b>B</b>	4, 5	3, 1, 2
<b>C</b>	7, 9	8

## 2.4 Vetor Tangente

A análise dos *mode-shapes* da matriz  $J_{sqv}$  apresenta ser um método efetivo e prático para a definição de áreas de controle em um sistema qualquer, uma vez que o mesmo retira as informações de sensibilidade da jacobiana expandida para todas as barras do sistema em relação à variação de potência reativa. Isto permite agregar barras de geração e compensadores às definições de áreas.

De forma complementar a isto, tal metodologia parte da análise dos autovetores relacionados com os menores autovalores da jacobiana no ponto de operação normal do sistema. Sob o ponto de vista de controle secundário de tensão, isto é adequado, pois, parte da consideração que o sistema não sofrerá grandes variações de carga.

Entretanto, sob o que tange a estabilidade de tensão, nem sempre o menor autovalor no ponto de operação equivale ao autovalor crítico do sistema no ponto de colapso de tensão [37]. Logo, em uma área delimitada e composta pelas barras críticas do sistema, a definição de uma hierarquia de controle que não contemple tais informações pode incorrer em ações de controle que depreciem a margem de carga. Este é decorrente da perda de suporte de potência reativa na região próxima as barras críticas. Em consequência disto, aumenta-se o risco do sistema entrar em colapso de tensão.

Portanto, as áreas de controle definidas pela análise dos *mode-shapes* e que contemplem as barras críticas do sistema, sob o ponto de vista de estabilidade de tensão, devem considerar estas como base de informações para o desenvolvimento da filosofia de controle daquelas áreas.

A técnica do vetor tangente (VT) aplicado a sistemas elétricos de potência possui a característica de identificar as barras críticas ou áreas críticas, de forma efetiva, através da utilização da jacobiana de fluxo convencional. Mostra-se em [37] e [38] que mesmo utilizando-se a jacobiana para um ponto de operação normal, em alguns casos, o vetor tangente consegue extrair as barras críticas do sistema.

De modo geral, o vetor tangente apresenta o comportamento das variáveis de estado, do problema de fluxo de potência (magnitudes e ângulo de fases das tensões), em relação a um parâmetro  $\lambda_{VT}$  qualquer. Quando o parâmetro definido é a variação de carga no sistema, o VT pode ser facilmente obtido através da jacobiana de fluxo de potência. Desta forma, os vetores colunas de variações de carga podem ser escritos de acordo com as equações (2.53) e (2.54).

$$\Delta P = \Delta\lambda_{VT} \cdot P_0 \quad (2.53)$$

$$\Delta Q = \Delta\lambda_{VT} \cdot Q_0 \quad (2.54)$$

Através da equação de fluxo convencional (2.1), pode-se reescrever:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

A partir disto, substituindo as equações (2.53) e (2.54) em (2.55), acima, e rearranjando a equação, pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\Delta\lambda_{VT}} = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

Por definição, o VT é dado por:

$$VT = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\Delta\lambda_{VT}} \quad (2.57)$$

Substituindo a equação (2.57) em (2.56), obtém-se:

$$VT = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Desta forma, pela equação (2.58), o vetor tangente pode ser facilmente obtido através da matriz jacobiana de fluxo de potência e do carregamento inicial do sistema.

## CAPÍTULO 3

### 3 SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY

O controle secundário de tensão, como já mencionado, é por muitas vezes realizado diretamente pelo operador do sistema, o qual reproduz ações sobre o sistema baseado nas informações de telemetria que possui e na experiência adquirida ao longo dos anos. Esta última base de dados, advindo da experiência do operador, implica na existência de um conjunto de informações qualitativas e incertezas que são prontamente traduzidas em ações de controle pelo operador. Entretanto, estas ações estão sujeitas à habilidade e ao erro humano [39].

Uma forma de traduzir as informações qualitativas e incertas em um conjunto de informações quantitativas e possível de implementação em uma malha de controle é através da utilização da lógica *fuzzy* (lógica nebulosa ou lógica difusa).

A Lógica *Fuzzy* teve sua origem através da introdução do conceito de Conjuntos *Fuzzy* por Lofti A. Zadeh em 1965. Este conceito é baseado em conjuntos com limites que não são nitidamente definidos, isto é, a definição de um elemento pertencer ou não a um conjunto é determinado por um grau de pertinência de este elemento pertencer ao conjunto [40] e [41].

O conceito da lógica *fuzzy* desafia não somente a teoria da probabilidade ao que tange o estudo sobre incertezas, mas afronta a teoria Aristotélica da lógica binária [40].

Ao se definir a situação do tempo em uma cidade, usualmente, utilizam-se termos como “nublado” ao invés de termos baseados em porcentagem como “90% de nuvens”. A primeira forma de apresentação da informação traz uma descrição vaga e menos específica sobre a situação do tempo, porém é muito mais significativa para o raciocínio humano.

O entendimento dos mais diversos processos físicos está baseado na imprecisão do raciocínio humano. Esta imprecisão, por sua vez, é uma forma de informação incrivelmente útil ao homem.

A capacidade de mapeamento de variáveis da teoria de conjuntos *fuzzy* fornece, não somente uma significativa representação das incertezas de medições, como também a representação dos conceitos vagos intrínsecos da linguagem

humana. A habilidade de incorporar este raciocínio em problemas complexos é responsável pela grande eficiência da lógica *fuzzy* [40] e [41].

Em linhas gerais, pode-se definir ainda que o conceito básico dos conjuntos *fuzzy* é, em essência, uma generalização dos conjuntos clássicos ou *crisp* (Nítidos) [40].

Neste aspecto, nos itens a seguir serão abordados alguns pontos importantes da teoria de conjuntos *fuzzy* e os conceitos necessários para o entendimento da aplicação de sistemas de inferência *fuzzy* no controle de um processo.

### 3.1 Conjuntos difusos

Na teoria dos conjuntos nítidos ou clássicos, os elementos de um universo de discurso são considerados pertencentes a um determinado conjunto  $A$  ou não pertencentes ao conjunto. Portanto, não há incertezas em relação aos limites do conjunto  $A$ . Supondo este conjunto  $A$  composto de pessoas altas com altura superior a  $1,80m$ , devido à dicotomia da teoria de conjuntos clássicos, uma pessoa com  $1,81m$  seria classificada como “alta” enquanto que uma pessoa com  $1,79m$  não.

Portanto, diversos conceitos utilizados diariamente na linguagem descrevem conjuntos que não seguem esta característica de dicotomia, tais como: conjunto de pessoas altas, idosas, carros de luxo, entre outros.

O conjunto *fuzzy* (difuso ou nebuloso) define matematicamente para cada elemento de um universo de discurso, um valor representativo do grau de pertinência deste elemento com o conjunto. Ou seja, a transição entre “pertence” e “não pertence” é gradual e caracterizada por Funções de Pertinência que possuem valores entre 0 e 1 [40], [41] e [42].

Desta forma, define-se um conjunto *fuzzy*  $A$  no universo de discurso  $X$  como um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (3.1)$$

onde  $\mu_A(x)$  é chamado de função de pertinência ( *Membership Function – MF* ) do conjunto  $A$ .

O universo de discurso  $X$  pode consistir de objetos discretos ou contínuos no espaço. Exemplos disso podem ser visualizados pelas Figura 3.1a e Figura 3.1b.

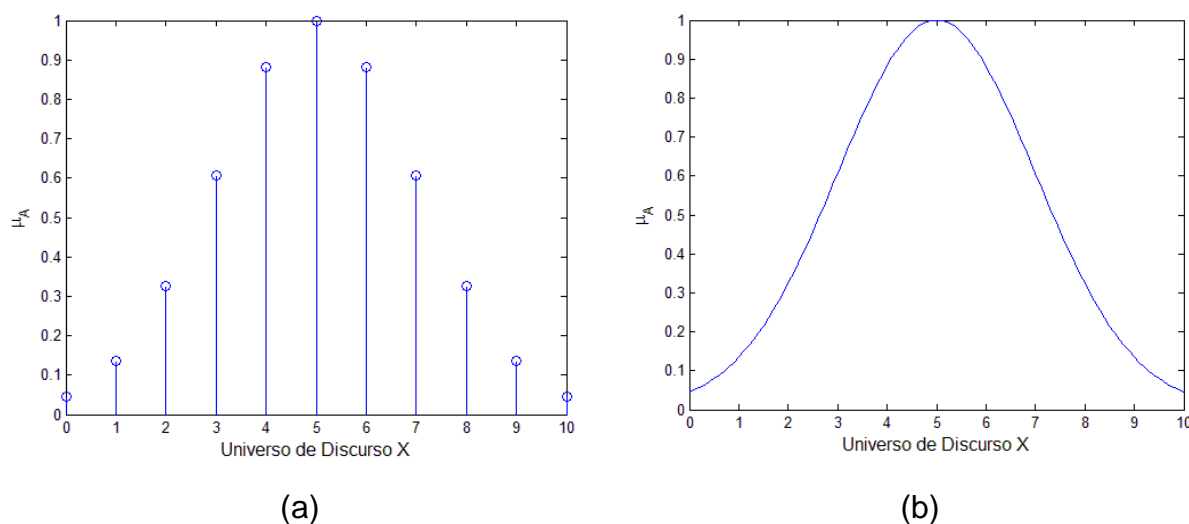


Figura 3.1 - Funções de pertinência (a) discreta e (b) contínua

Usualmente, em um universo de discurso com espaço contínuo, divide-se este universo em diversos conjuntos *fuzzy* com suas respectivas funções de pertinência com o intuito de cobrir o universo de uma maneira uniforme. A estes conjuntos *fuzzy* são atribuídos nomes, ou ainda, variáveis linguísticas [42]. A Figura 3.2 ilustra um universo de discurso, denominado “Idade”, dividido em três conjuntos *fuzzy* atribuídos com as variáveis linguísticas: “Jovem”, “Adulto” e “Idoso”.

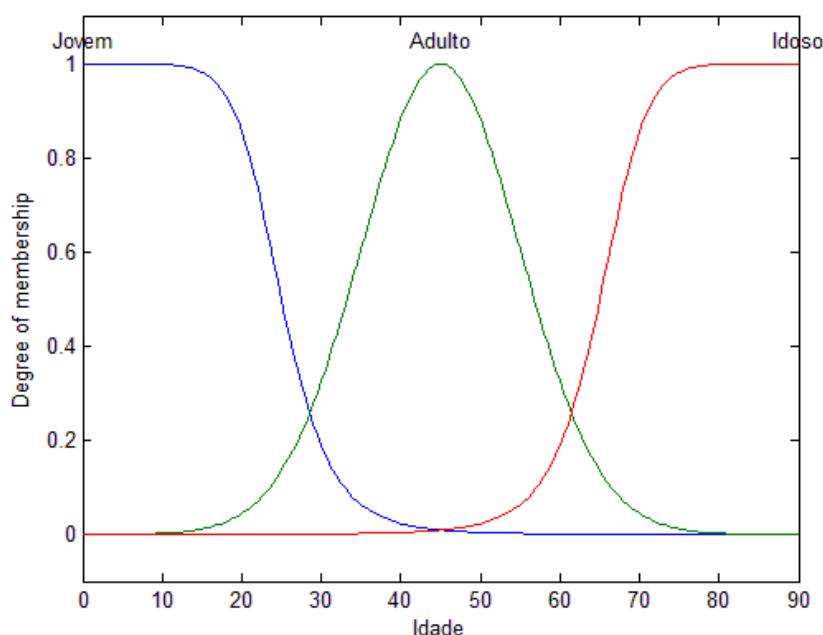


Figura 3.2 - Universo de discurso "Idade" dividido em três conjuntos *fuzzy*.

Conforme mencionado anteriormente, uma das grandes vantagens da teoria de conjuntos *fuzzy* é o mapeamento entre variáveis nítidas e variáveis linguísticas. A Figura 3.2 ilustra bem este fato, visto que para um valor de idade  $x$ , dentro do universo de discurso, as funções de pertinência definidas apresentam para  $x$ , que é

um valor quantitativo, um grau de pertinência para cada conjunto *fuzzy* associado, este sendo um valor qualitativo.

### 3.2 Tipos de funções de pertinência

Embora a teoria de conjuntos *fuzzy* apresente grandes vantagens sobre a teoria de conjuntos clássica, a sua eficácia é criticamente dependente da capacidade do projetista em definir funções de pertinência apropriadas ao contexto da aplicação [40].

As funções de pertinência podem ter diversos formatos e possuir propriedades específicas para uma dada aplicação. Em alguns casos, o significado semântico para as variáveis nítidas, conseguidas através das funções de pertinência, não são muito sensíveis à variação do formato da função e, em razão disto, funções simples são convenientes. No entanto, para muitos casos os conjuntos *fuzzy* podem ser expressos por uma família de funções parametrizadas. As mais comuns são:

- MF triangulares;
- MF trapezoidais;
- MF Gaussiana;
- MF Sino;
- MF Sigmoide;

Para melhor entendimento das definições e parametrizações destas funções de pertinência, o Apêndice A descreve cada uma sucintamente.

### 3.3 Operações em conjuntos difusos

As três operações básicas dos conjuntos clássicos (diferença, união e intersecção) podem ser generalizadas e aplicadas aos conjuntos *fuzzy*. Estas operações são comumente chamadas *Operações básicas Fuzzy* e possuem uma importância fundamental na elaboração de um sistema de inferência *fuzzy*, uma vez que estas operações servem para a construção da base de regras difusas a fim de traduzir o conhecimento vago de um processo [40].

Assim, apresentam-se as operações básicas *fuzzy* de diferença, união e intersecção considerando um universo de discurso  $X$ , tal que  $x \in X$ :

$$\bar{A} = 1 - A(x) \quad (3.2)$$

$$(A \cup B)(x) = \max[A(x), B(x)] \quad (3.3)$$

$$(A \cap B)(x) = \min[A(x), B(x)] \quad (3.4)$$

Neste contexto, não somente as variáveis de entrada do sistema ou as funções de pertinência definidas sobre um universo de discurso recebem termos linguísticos, mas também as operações realizadas com os conjuntos *fuzzy* podem receber termos linguísticos. Desta maneira, pode-se associar o operador de diferença ao termo linguístico “NÃO”. Já os operadores de união e intersecção são associados aos termos linguísticos “OU” e “E”. Usualmente são atribuídos, também, a estes operadores a denominação de *Termos Conectivos* devido à função de ligação que exercem entre os conjuntos *fuzzy* dentro de uma regra.

Lembra-se, porém, que estas não são as únicas formas de operações existentes na teoria de conjuntos *fuzzy*. No entanto, são suficientes para o desenvolvimento de um sistema de inferência *fuzzy*.

### 3.4 Regras *fuzzy*

As variáveis linguísticas são uma alternativa a modelagem do pensamento humano, ou ainda, possui a função resumir informações e expressá-las em termos de conjuntos *fuzzy* [42].

Portanto, as regras difusas fornecem uma descrição linguística representativa do conhecimento humano sobre um determinado processo. Estas são tipicamente expressas com base em uma informação antecedente (premissa ou hipótese) já conhecida que implica em uma consequência (conclusão). Por isto, são comumente denominadas de regras “SE-ENTÃO” e apresentam a seguinte estrutura:

$$\mathbf{SE} \ x \ \acute{e} \ A, \ \mathbf{ENT\tilde{A}O} \ y \ \acute{e} \ B \quad (3.5)$$

onde  $A$  e  $B$  são variáveis linguísticas associadas a conjuntos *fuzzy* em universos de discurso  $X$  e  $Y$ , respectivamente.



Em (3.5), “ $x$  é  $A$ ” e “ $y$  é  $B$ ” correspondem aos termos denominados de “antecedente” e “consequente”, respectivamente, dentro da regra *fuzzy*.

Uma determinada regra *fuzzy* pode conter quantos elementos “antecedentes” forem necessários para expressar um conhecimento. Nestes casos utilizam-se os termos linguísticos conectivos “OU” e “E” para representar as operações *fuzzy*, equações (3.3) e (3.4), a serem aplicadas entre os conjuntos *fuzzy* associados aos antecedentes. A equação (3.6) apresenta um exemplo de regra com  $n$  antecedentes utilizando operador *fuzzy* de intersecção:

$$\mathbf{SE } x_1 \text{ é } A \mathbf{ E } x_2 \text{ é } B \mathbf{ , ENTÃO } y \text{ é } C \quad (3.6)$$

onde  $x_1$  e  $x_2$  são as variáveis de entrada do sistema,  $A$  e  $B$  são as funções de pertinência associadas às entradas,  $y$  é a variável de saída, onde  $C$  representa a função de pertinência associada à resposta do sistema.

Basicamente, uma regra difusa estabelece uma relação entre as variáveis de entrada, no caso  $x_1$  e  $x_2$ , e a variável de saída  $y$ . Esta relação, por sua vez, é representada pelo termo linguístico “ENTÃO” e compõe a etapa de “Implicação *Fuzzy*” dentro do processo de desenvolvimento de um sistema *fuzzy*. Há diversos tipos de formas de implicação descritos na literatura especializada [40], [41] e [42], porém um dos mais utilizados é o método de implicação proposto por Mandani, o qual utiliza o operador de intersecção, “*mín*”, para interpretar a conjunção “ENTÃO”.

Dado um determinado processo, usualmente é definido um conjunto de base de regras a fim de descrever todo o comportamento e conhecimento vinculado com o processo. Entretanto, nestes casos há a necessidade de realizar uma associação dos resultados obtidos, individualmente, pelas regras desenvolvidas. Esta etapa denomina-se “Agregação *Fuzzy*” e, dentro da teoria de conjuntos *fuzzy*, utiliza o operador de união, “*máx*”, para agregar todas as respostas obtidas pelas regras.

### 3.5 Métodos de Defuzzificação

Em um sistema de inferência *fuzzy*, as entradas podem ser variáveis nítidas ou variáveis linguísticas (*fuzzy*), enquanto que as saídas são apresentadas através de funções de pertinência. Porém, para uma aplicação em uma malha de controle é desejado que tanto a entrada, quanto a saída do sistema sejam variáveis nítidas.

Para tanto, faz-se necessário a aplicação de um método de “Defuzzificação” com o intuito de obter uma resposta nítida que aproxime a saída *fuzzy*.

A Defuzzificação é aplicada a partir do resultado da agregação das regras *fuzzy*. Os principais métodos são:

- Centróide de área;
- Centro de máximo;
- Média do máximo;

Para melhor entendimento destes métodos, as referências [40], [41] e [42] os descrevem e detalham convenientemente.

### 3.6 Sistema de inferência *fuzzy*

Os temas endereçados pelos itens anteriores compõem as bases dos chamados Sistemas de Inferência *Fuzzy*, ou ainda *Fuzzy Inference Systems* (FIS), os quais apresentam boas aplicações em uma grande diversidade áreas.

A característica multidisciplinar dos FIS está na capacidade de solucionar problemas de difícil entendimento ou contextos que exijam soluções rápidas e aproximadas. Pois, de forma geral, os sistemas de inferência *fuzzy* mapeiam um conjunto de entradas em um conjunto de saídas apresentadas por variáveis linguísticas ou outras formas de informações *fuzzy* [41].

A estrutura básica de um FIS para aplicação em uma malha de controle consiste em quatro módulos:

- Fuzzificação de entradas;
- Base de regras;
- Motor de inferência *fuzzy*;
- Defuzzificação de saídas;

Entre estes quatro módulos apresentados, vale notar que os três primeiros compõem um Sistema de Inferência *Fuzzy* convencional. Entretanto, com a agregação do módulo de Defuzzificação cria-se a possibilidade de inclusão de um sistema FIS em uma malha de controle. Deste modo, a este conjunto é dado o nome de Controle *Fuzzy*, o qual pode ser visualizado na Figura 3.3.

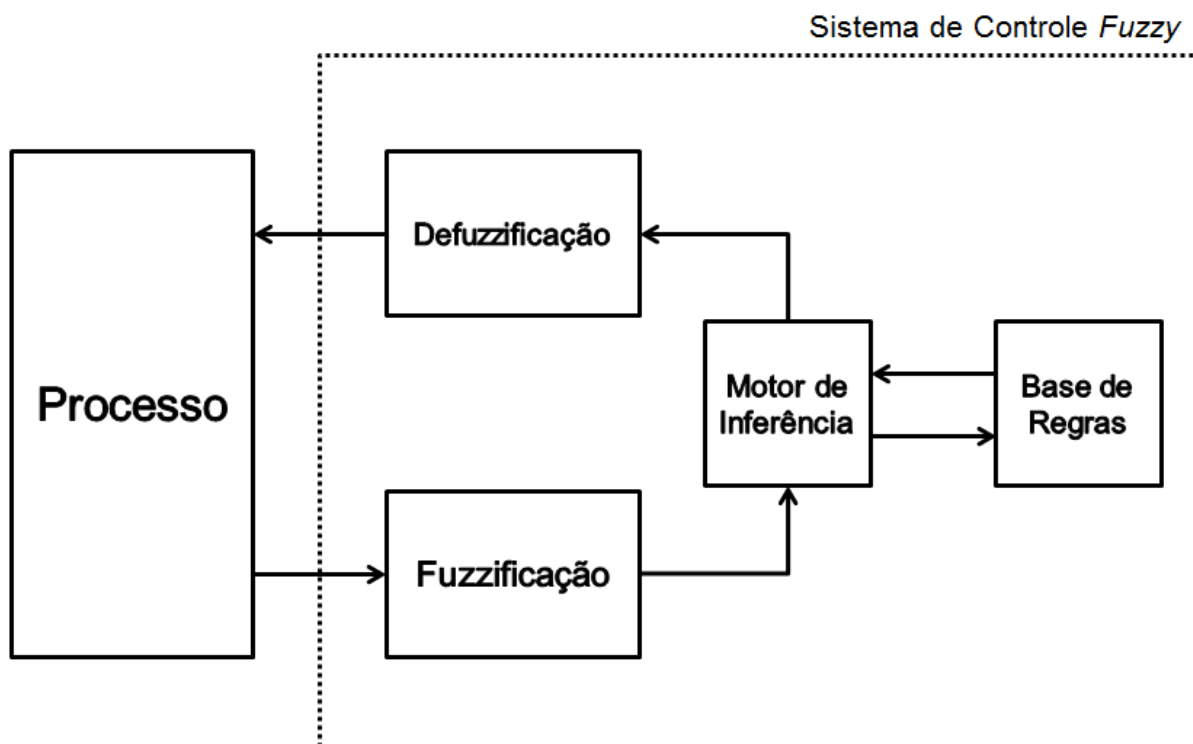


Figura 3.3 - Esquema de aplicação de um sistema de inferência *fuzzy* em uma malha de controle

Observa-se, na Figura 3.3, que inicialmente o sistema de controle *fuzzy* transforma as variáveis nítidas obtidas do processo em variáveis linguísticas através do módulo de “Fuzzificação”. Esta etapa corresponde ao mapeamento realizado pelas funções de pertinência, como visto no item 3.1.

As variáveis *fuzzy* são, então, aplicadas ao “Motor de Inferência” onde são realizadas operações *fuzzy* entre os conjuntos difusos definidos pelas funções de pertinência. Estas operações, por sua vez, são definidas pela “Base de Regras” elaborada. Esta etapa corresponde aos itens 3.3 e 3.4 apresentados.

A saída do módulo de “Motor de Inferência” é representada por uma variável linguística, a qual não possui um significado efetivo para o controle de um processo. Desta forma, a última etapa do Controle *Fuzzy*, “Defuzzificação”, é responsável por traduzir e aproximar as respostas obtidas pelo módulo anterior em valores compatíveis com o processo em controle, ou seja, em valores nítidos.

Assim, definidas todas as etapas, completa-se a malha do Sistema de Controle *Fuzzy*. Como mencionado, este controle pode ser aplicado a processos, nos quais, os objetivos a se cumprir podem ser aproximados e, também, expressados através do conhecimento humano. O Controle Secundário de Tensão realizado pelos operadores do sistema é um exemplo disso. Logo, o Capítulo 4, a seguir, apresenta uma metodologia para o desenvolvimento de um Sistema de Controle de Tensão baseado em Lógica *Fuzzy*.

## CAPÍTULO 4

### **4 SISTEMA DE CONTROLE SECUNDÁRIO DE TENSÃO BASEADO EM LÓGICA *FUZZY***

Conforme foi discutido nos capítulos anteriores, a definição de uma filosofia de controle de tensão adequada envolve análises complexas e está longe de possuir uma solução trivial ou única.

A utilização de um determinado recurso de controle de tensão com o objetivo de manter as tensões em barramentos de referência do sistema em níveis de operação aceitáveis não é, em prática, a única consideração realizada pelos operadores do sistema na execução de uma ação de controle. O nível de tensão de barramentos ao longo do sistema, a disponibilidade de recursos de potência reativa, a posição dos tapetes de transformadores e a previsão de carga à curto prazo são alguns dos fatores, juntamente com a experiência do operador, que estão por trás de uma ação de controle desenvolvida manualmente em um centro de controle.

Ademais, a quantidade de informações necessárias, e por muitas vezes conflitantes, para o adequado controle de tensão por parte do operador do sistema somado a pressão exercida sobre estes cria uma ambiente desfavorável e perigoso à segurança operativa do sistema.

Os sistemas elétricos de grande porte aumentam a complexidade tanto sobre o olhar da hierarquia de controle quanto em relação à comunicação necessária à coordenação dos elementos de controle.

A delimitação de áreas de controle minimiza a análise sobre o problema ao desacoplar as ações de controle aplicadas ao sistema. Os barramentos do sistema são agrupados em áreas de atuação, ainda que estes sejam eletricamente conectados, a partir da análise de sensibilidade da variação de tensão em relação à variação da injeção de potência reativa em uma determinada barra.

A seleção de áreas realizada em [34] apresenta uma ótima solução para estabelecimento de áreas de controle, pois, verifica a coerência entre as barras do sistema com respeito a sua tensão, dado uma variação de potência reativa.

No entanto, em sistemas de grande dimensão, estas áreas são compostas por um grande número de barras, tanto de carga quanto de geração, o que dificulta

o estabelecimento da coordenação dos elementos de controle de tensão. Ou seja, supondo-se uma barra de geração equivalente ao maior módulo no autovetor dominante, a elevação da tensão deste elemento com o intuito de eliminar uma violação de tensão pode implicar, em alguns casos, na subexcitação de máquinas menores e eletricamente próximas. Além disso, os ECT com os maiores componentes no autovetor, utilizado para delimitar a área, não constituem, necessariamente, os melhores candidatos ao controle das barras de carga com problemas no suporte de potência reativa.

Uma solução para este problema é a definição de subáreas de controle a fim de realizar um controle mais local, próximo às barras com problemas de suporte de potência reativa, considerando-se as limitações de suporte de potência reativa das máquinas.

Em outro aspecto, conforme discutido nos capítulos precedentes, a utilização de ferramentas que agreguem o raciocínio humano e seu conhecimento heurístico, baseado nos fenômenos que o cercam, em forma de um sistema computacional inteligente permite solucionar problemas complexos, como é o controle secundário de tensão de sistemas elétricos.

A teoria de conjuntos *fuzzy* que findou no desenvolvimento dos Sistemas de Inferência *Fuzzy* possui a capacidade de representação do conhecimento humano sobre um determinado processo por meio de regras difusas. Desta forma, permite combinar informações de dados reais (tensão em barra de carga, reserva de potência reativa, entre outros) com a capacidade de inferência humana em um sistema de controle.

Portanto, com o objetivo de definir um sistema de controle de tensão que agregue os aspectos expostos, propõe-se uma metodologia para o desenvolvimento de sistemas *fuzzy* aplicados ao controle secundário de tensão, de maneira a indicar uma ação de controle sobre o sistema automaticamente. Assim, minimiza-se a exigência sobre o operador do sistema, auxiliando-o na tomada de decisões. Para tanto, o sistema será dividido em subáreas de controle com sistemas *fuzzy* aplicados individualmente a cada subárea.

Neste capítulo são apresentados a metodologia para delimitação de áreas utilizada e o desenvolvimento da base de regras *fuzzy* para estabelecimento de um Sistema de Controle Secundário de Tensão.

## 4.1 Considerações Iniciais

O sistema utilizado para a determinação de subáreas de controle e posterior aplicação de um sistema secundário de tensão utilizando-se lógica *fuzzy* é o sistema acadêmico IEEE 118 (Anexo A). Este possui uma boa quantidade de barras de carga e de geração distribuídas uniformemente pelo sistema, o que possibilita a criação de subáreas com elementos de controle de tensão suficientes. Em função da modificação de alguns parâmetros do sistema, o Apêndice B traz os dados de barra considerados para a delimitação de áreas. Os dados de linhas foram mantidos.

Para a determinação da matriz jacobiana  $J_{sqv}$ , bem como da solução das equações de fluxo que regem o sistema, utilizou-se um programa de fluxo de potência convencional composto por um algoritmo que implementa o método da continuação, possibilitando o fornecimento da curva PV e vetor tangente [43].

Conforme mencionado previamente, devido à formulação da matriz jacobiana  $J_{sqv}$  incluir as equações de potência reativa das barras PV e *Swing*, o autovetor referente ao menor autovalor desta matriz apresenta um acoplamento entre todas as barras do sistema (vide Figura 2.1) e, portanto, não agrega informações úteis à formação das áreas de controle. Logo, no decorrer deste trabalho serão apresentados somente os autovetores a partir do segundo menor autovalor.

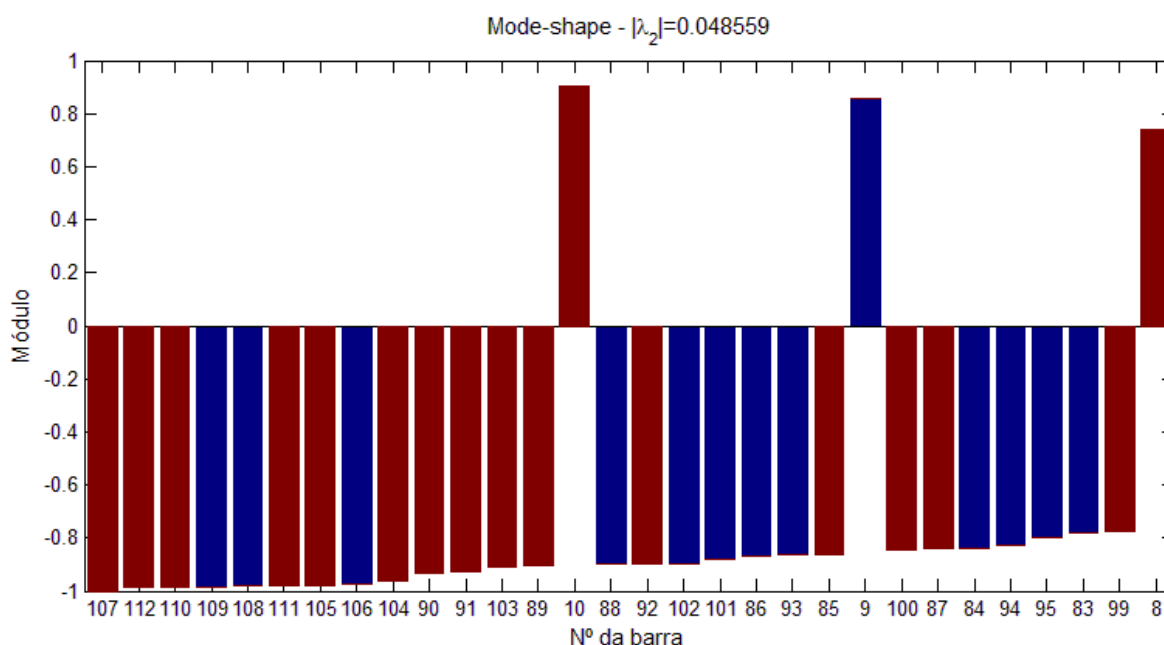


Figura 4.1 - *Mode-Shape* para o autovalor  $\lambda_2$  do sistema IEEE 118

A delimitação de áreas através da análise dos *mode-shapes* relacionados com os menores autovalores da matriz  $J_{sqv}$ , como apresentado no Capítulo 2, define três grandes áreas de controle para o sistema IEEE 118 em estudo, a partir do

segundo e terceiro menores autovalores da matriz  $J_{sqv}$ . A Figura 4.1 e a Figura 4.2 apresentam os *mode-shapes* referentes a estes autovalores. Os *mode-shapes* foram dispostos em ordem decrescente da magnitude dos componentes do autovetor. O eixo das abscissas representa o número do barramento associado ao componente do autovetor, sendo que as barras de carga estão representadas em cor azul e as barras compostas por geradores e/ou compensadores síncronos são apresentadas em vermelho. Devido a grande quantidade de barras no sistema, somente os 30 maiores elementos do *mode-shape* foram apresentados.

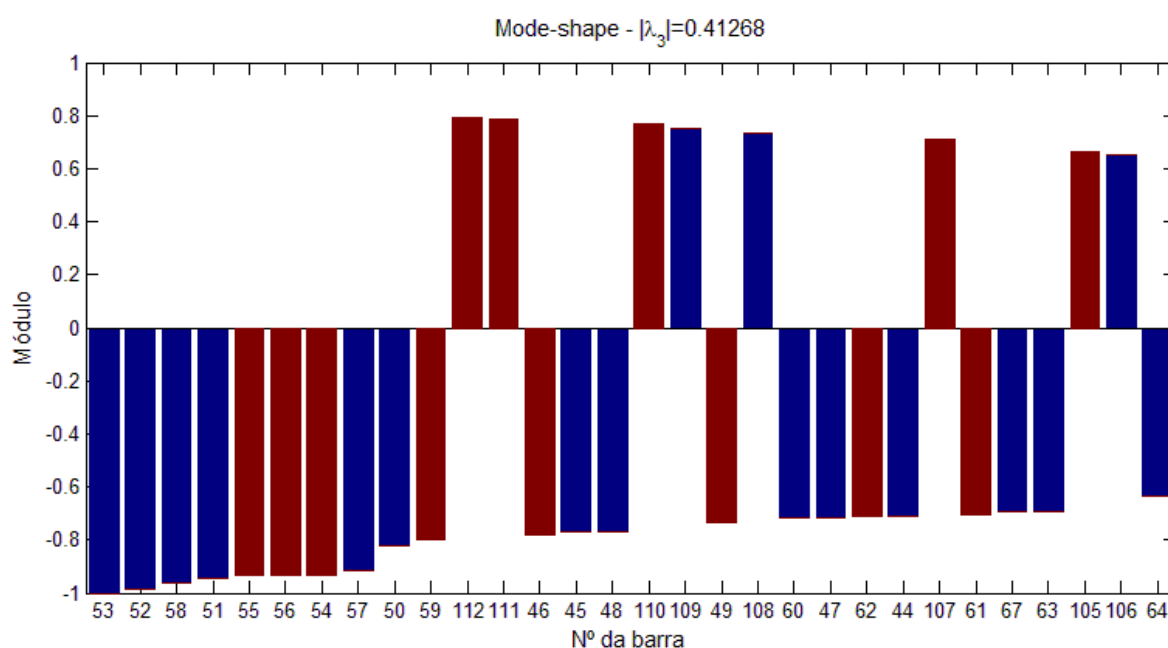


Figura 4.2 - *Mode-Shape* para o autovalor  $\lambda_3$  do sistema IEEE 118

A Tabela 4.1, a seguir, apresenta e identifica as áreas de controle e as barras que as compõem resultantes da análise dos autovetores.

Tabela 4.1 - Descrição das áreas de controle para o sistema IEEE 118

Área	Barras de carga	Barras de Geração
1	71, 73, 78, 79, 82, 83, 84, 86, 88, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 101, 102, 106, 108, 109, 118	76, 77, 80, 85, 87, 89, 90, 91, 92, 99, 100, 103, 104, 105, 107, 110, 111, 112
2	2, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 14, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 28, 29, 30, 33, 114, 115, 117	1, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 18, 19, 25, 26, 27, 31, 32, 113
3	41, 43, 44, 45, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 57, 58, 60, 63, 64, 67	42, 46, 49, 54, 55, 56, 59, 61, 62, 65, 66

As barras compostas por compensadores síncronos foram agrupadas juntamente com as barras dispostas de geradores, pois em termos de controle de tensão, busca-se o suporte de potência reativa das áreas problemáticas através do controle destes dois elementos. Verifica-se, pela Tabela 4.1, a presença de um número considerável de barras dispostas em cada uma das áreas de controle. A grande quantidade de barramentos com elementos de controle (Coluna 3) somado ao amplo número de barras de carga (Coluna 2) dificulta a análise e desenvolvimento de um sistema de controle adequado, como já mencionado. A seguir, uma metodologia para aproximar o controle através de subáreas é apresentada.

#### 4.2 Definição das subáreas de controle pelo *Mode-Shape*

Com o propósito de definir subsídios para o desenvolvimento de um Sistema de Controle Secundário de Tensão baseado em lógica *fuzzy*, adotou-se a análise de autovalores e autovetores para o fim de agrupamento de barras em um sistema elétrico, conforme apresentado no Capítulo 2. Porém, além da delimitação de áreas, busca-se a formação de subáreas, de forma a minimizar o problema de coordenação dos elementos de controle disponíveis e tornar o controle de tensão mais efetivo em caso de violações de tensão.

Conforme estabelecido pelas equações (2.47), (2.48) e (2.49), e aqui reescritas através das equações (4.1), (4.2) e (4.3), os menores autovalores da matriz  $J_{sqv}$  determinam os modos mais dominantes em relação à sensibilidade da variação de tensão pela variação de injeção de potência reativa.

$$J_{sqv} = \Phi \cdot \Lambda \cdot \Psi \quad (4.1)$$

$$J_{sqv}^{-1} = \Phi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \Psi \quad (4.2)$$

$$\Delta V = \Phi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \Psi \cdot \Delta Q \quad (4.3)$$

Desta forma, analisando-se os *mode-shapes* dos autovetores referentes aos menores autovalores da matriz  $J_{sqv}$  é possível agrupar os barramentos do sistema em áreas, como visto pela Tabela 4.1. Ainda, segundo estabelecido em [34], duas ou mais barras pertencem a uma mesma área se os respectivos *mode-shapes*, para um determinado autovalor, são semelhantes.



Pelo aspecto da análise modal, a observação dos autovetores referentes os menores autovalores do sistema fornece a informação dos barramentos mais susceptíveis a variações de tensão dado uma variação de potência reativa. Como estes modos (autovalores) analisados são os menores do sistema e, por conseguinte, os dominantes sobre ele, torna-se cabível concentrar o controle de tensão dando prioridade às barras com maiores amplitudes nestes autovetores.

Adicionalmente, com base na premissa anterior, pode-se estabelecer de forma análoga que barras do sistema dispostas dentro de uma mesma área podem ser delimitadas por uma subárea composta pelas barras com *mode-shapes* de magnitudes semelhantes. Ou seja, isto significa compor uma subárea através dos barramentos que sofrem variações de tensão similares para uma mesma variação de potência reativa injetada.

Supondo uma análise para a Área 3 do sistema, definida pelo *mode-shape* do autovalor  $\lambda_3$  (terceiro menor), verifica-se visualmente que as primeiras oito barras do modo possuem módulos muito próximos, sugerindo um maior acoplamento entre estas (barras 53 a 57 na Figura 4.3), se comparado com as demais barras desta mesma área. Portanto, dada uma variação de potência reativa nesta área, o primeiro grupo de barras sofrerá variações aproximadamente iguais, além de serem as mais influenciadas por esta variação. As demais barras desta mesma área sofrerão variações no mesmo sentido, porém com uma amplitude menor.

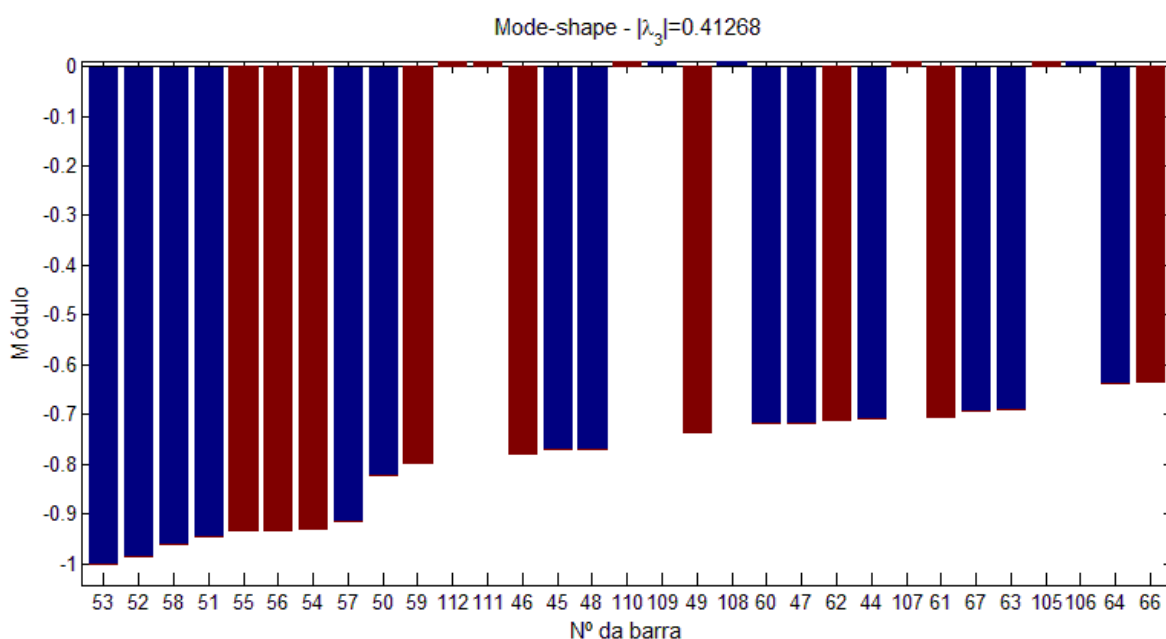


Figura 4.3 - Primeiros componentes do *Mode-Shape* da Área 3

Logo, a partir da Figura 4.3, verifica-se que as barras de carga 53, 52, 58 e 51 são as mais propícias a eventuais quedas de tensão devido ao aumento de carga,

podendo ser caracterizadas como barras piloto desta subárea e, portanto, devem ser monitoradas a fim de evitar violações de tensão.

Em contrapartida, as barras de geração 55, 56 e 54 são as barras candidatas ao controle de tensão desta subárea. Além disso, por possuírem módulos muito semelhantes, indicativo que estas variam suas tensões de forma conjunta, implica-se que durante o controle de tensão os três elementos de controle devem atuar na mesma direção a fim de evitar a extrapolação de limites de geração de potência reativa de uma ou outra máquina.

A barra de carga 57 possui um módulo ligeiramente inferior às barras anteriores, podendo esta ser incluída como barra monitorada ou designada, simplesmente, como barra de fronteira desta subárea.

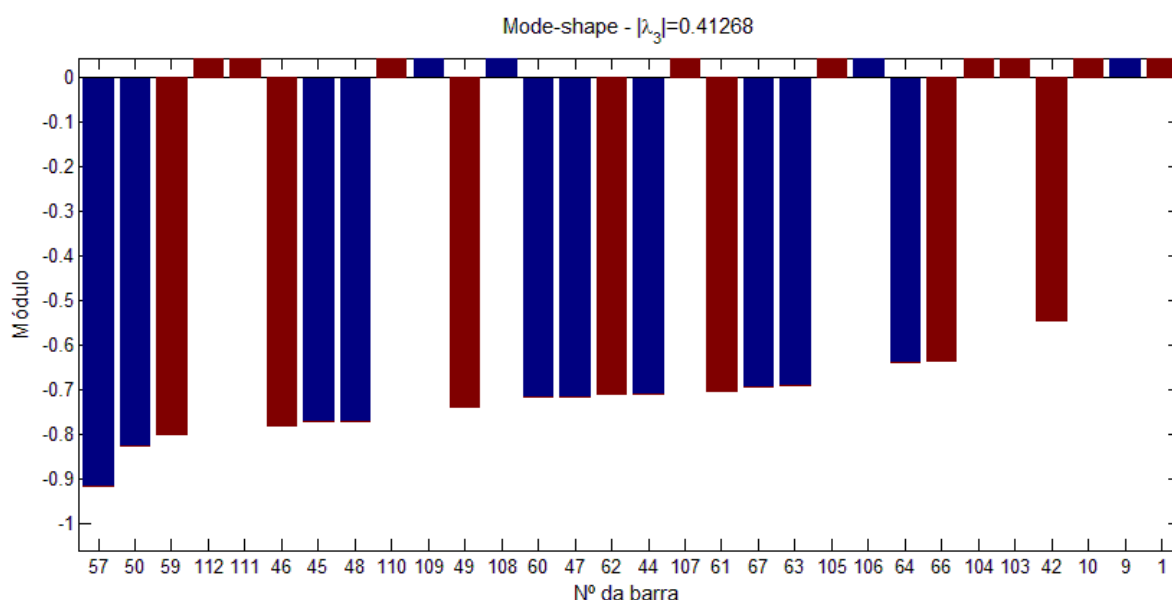


Figura 4.4 - Componentes subsequentes do *Mode-Shape* da Área 3

Os barramentos subsequentes (apresentados na Figura 4.4) possuem magnitudes semelhantes entre si, porém, proporcionalmente pequenas se comparadas com os módulos das oito primeiras barras já analisadas (Figura 4.3). Conforme os módulos diminuem no *mode-shape*, os barramentos do sistema passam a possuir uma influência mais uniforme sobre o modo em análise. Desta forma, dificulta-se a visualização e determinação de novas subáreas.

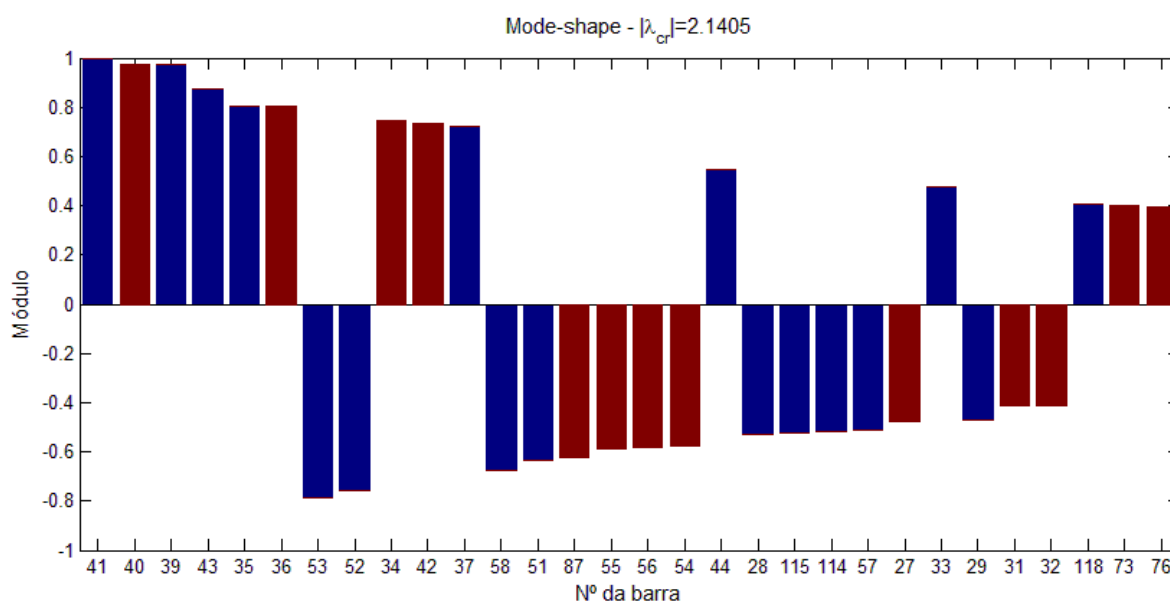
Aplicando-se a técnica do vetor tangente à matriz jacobiana de fluxo de carga, a fim de determinar a barra crítica em termos de estabilidade de tensão, verifica-se que a barra 41, presente da Área 3, é identificada com o maior componente do vetor tangente. Na Tabela 4.2 mostram-se os cinco maiores termos do vetor tangente:

Tabela 4.2 - Ranking dos cinco primeiros componentes do vetor tangente

Índice Vetor Tangente (%)	N° da Barra
100,00	41
94,50	39
86,39	33
86,18	117
85,53	35

Conforme mencionado, a instabilidade de tensão é um problema local, devido à incapacidade de suporte de potência reativa. Com o objetivo de manter o controle da tensão, bem como do fluxo de potência reativa, pode-se definir uma subárea composta pelas barras próximas à barra crítica.

No capítulo 2, apontou-se a característica do vetor tangente em convergir para o autovetor à direita no ponto de colapso de tensão. Desta forma, verificando-se a correlação dos barramentos do autovetor crítico por análise modal, tem-se:

Figura 4.5 - *Mode-shape* do autovalor crítico do sistema

Observa-se, pela Figura 4.5, que é possível verificar uma forte correlação entre os barramentos 41, 39, 43, 35 e 37 de carga e as barras de geração 40, 36, 34 e 42. Ainda, verifica-se que as barras de geração 55, 56 e 54, definidas na primeira subárea, possuem certa influência sobre o autovetor à direita do autovalor crítico do sistema, ainda que com sentidos opostos aos da barra crítica. Esta influência implica que uma perda de suporte de potência reativa de qualquer uma destas máquinas impacta diretamente na margem de carga do sistema. Logo, os limites de geração



A Tabela 4.3 a seguir apresenta um resumo das subáreas referentes à Área 3 resultantes da análise modal. Ressalta-se que o conjunto das três subáreas possui um número maior de barras que a Área 3 previamente definida e apresentada pela Tabela 4.1. No entanto, isto se justifica pela inclusão da subárea referente à barra crítica do sistema, Barra 41, a qual indicou a agregação de barras que antes não pertenciam a nenhuma área de controle.

Tabela 4.3 - Descrição das subáreas definidas para a Área 3

Subárea	Barras de carga	Barras de geração
<b>3A</b>	51, 52, 53, 58	54, 55, 56
<b>3B</b>	44, 45, 47, 48, 50, 60, 63, 64, 67	46, 49, 59, 61, 62, 66
<b>3C</b>	35, 37, 39, 41, 43	34, 36, 40, 42

A metodologia de delimitação das subáreas do sistema apresentada para área 3 do sistema IEEE 118, pode ser facilmente estendida para as demais áreas do sistema (Tabela 4.1). Para isto, utilizam-se os mesmos *mode-shapes* empregados na definição das áreas de controle do sistema, os quais se relacionam com os menores autovalores da matriz jacobiana expandida e, portanto, os mais dominantes. A Tabela 4.4 apresenta um resumo das subáreas definidas para o sistema completo.

Tabela 4.4 - Descrição das áreas e subáreas definidas para o sistema IEEE 118

Área	Subárea	Barras de carga	Barras de geração
<b>1</b>	<b>A</b>	106, 108, 109	104, 105, 107, 110, 111, 112
	<b>B</b>	84, 86, 88, 93, 94, 101, 102	85, 87, 89, 90, 91, 92, 100, 103
	<b>C</b>	78, 79	77, 80
	<b>D</b>	71, 75, 118	70, 73, 74, 76
<b>2</b>	<b>A</b>	2, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 117	1, 4, 6, 8, 10, 12
	<b>B</b>	17, 20, 21, 22, 28, 29, 30, 114, 115	15, 18, 19, 25, 26, 27, 31, 32, 113
<b>3</b>	<b>A</b>	51, 52, 53, 58	54, 55, 56
	<b>B</b>	44, 45, 47, 48, 50, 60, 63, 64, 67	46, 49, 59, 61, 62, 66
	<b>C</b>	35, 37, 39, 41, 43	34, 36, 40, 42

Diante da definição de todas as subáreas do sistema em estudo, a Figura 4.8 apresenta o diagrama unifilar do sistema IEEE 118 com destaque para as áreas e subáreas de controle.

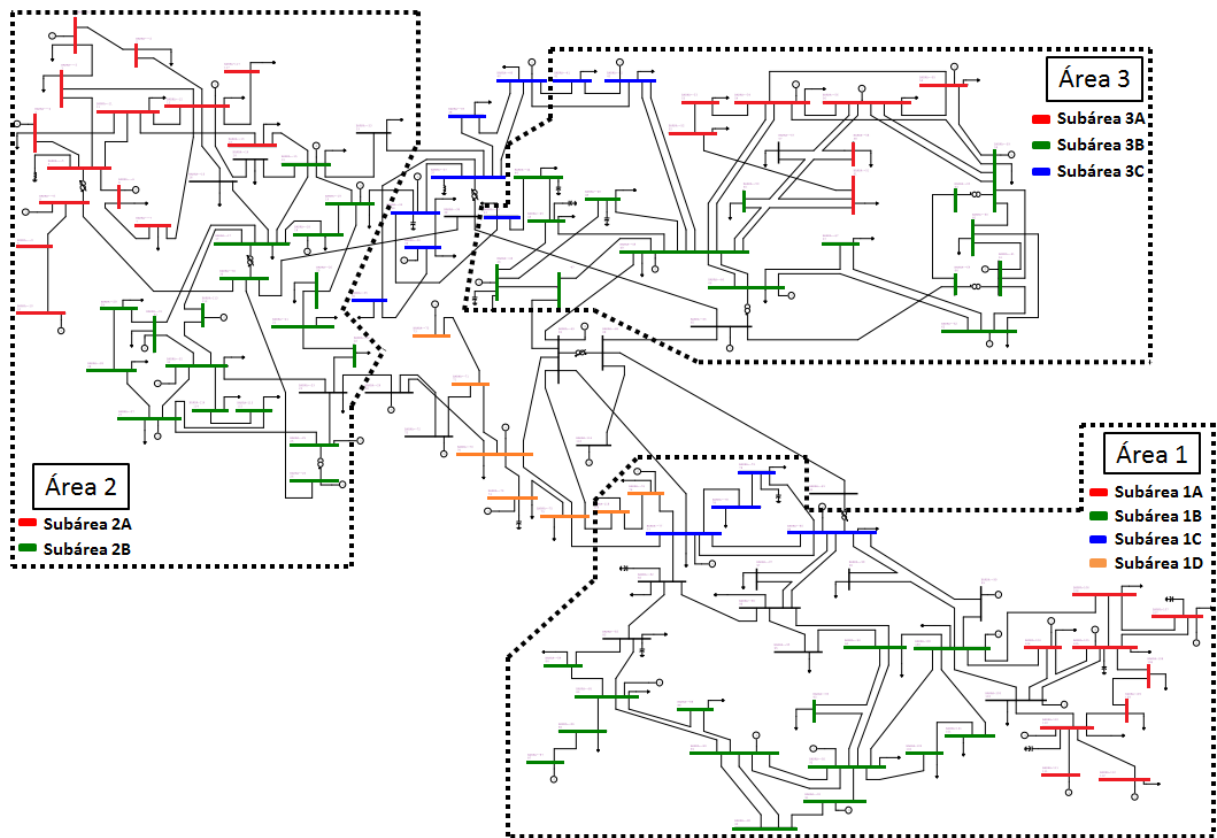


Figura 4.8 - Delimitação de áreas e subáreas para o sistema IEEE 118

### 4.3 Sistema de Inferência *Fuzzy*

O controle de tensão aqui considerado, além de corrigir eventuais violações de tensão no sistema, tem como premissa a manutenção das reservas de potência reativa dos elementos de controle associados as suas respectivas subáreas. Desta forma, não somente as informações das magnitudes das tensões nas barras de carga, mas também as informações de potência reativa das máquinas deverão ser inseridas como variáveis de entrada do problema.

Para a minimização da complexidade do problema a ser resolvido, o sistema de controle será considerado em dois estágios. O primeiro está relacionado puramente com o controle secundário de tensão. Este incorporará as regras de controle do sistema *fuzzy* baseado nas tensões das barras de carga da subárea. O segundo estágio será responsável por definir as regras e direções de atuação dos

elementos de controle com base na saída do estágio anterior e nas informações das reservas de potência reativa das máquinas participantes do controle da subárea.

No processo geral, o sistema de controle secundário de tensão com lógica *fuzzy* proposto irá atuar diretamente nas regiões com problemas de tensão, tentando minimizar as violações de tensão localmente. Ainda, baseado nas informações retiradas dos autovetores associados aos autovalores críticos do sistema, buscar-se-á evitar a depreciação da margem de carga devido a ações de controle.

Portanto, cada subárea de controle, definida para o sistema, será composta por um sistema de controle *fuzzy* independente, o qual agregará regras de inferência *fuzzy* que consideram características particulares de cada subárea. A Figura 4.9 ilustra a malha de controle aplicada às subáreas, individualmente.

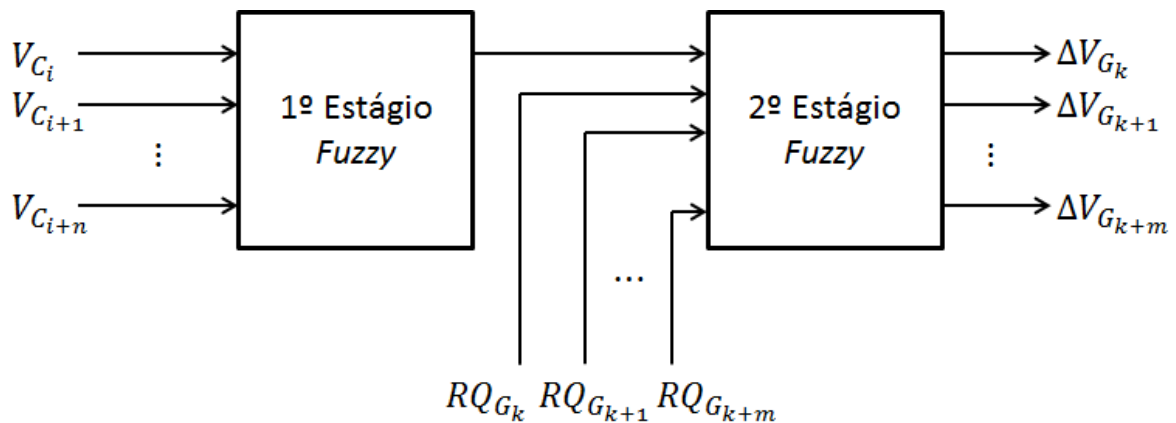


Figura 4.9 - Esquema de controle secundário de tensão aplicado a uma subárea

#### 4.3.1 Primeiro estágio de controle

Como já mencionado, o controle de tensão proposto à aplicação sobre as subáreas do sistema é composto por dois estágios de controle, sendo cada um destes estágios desenvolvido por um sistema de inferência *fuzzy*.

A Figura 4.10 apresenta o diagrama do primeiro estágio de controle *fuzzy*. As variáveis de entrada,  $V_{C_i}$ , são as tensões dos barramentos de carga da subárea ao qual o controle será aplicado. A saída deste estágio é representada por apenas uma variável, denominada  $V_{CA}$ , que indica da necessidade de ação de controle de tensão pelos elementos de controle da subárea e servirá de variável de entrada para o segundo estágio.

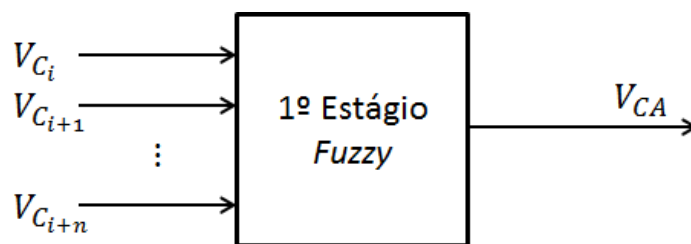


Figura 4.10 - Primeiro estágio de controle *fuzzy*

As variáveis de entrada, expressas em valores nítidos, são traduzidas em variáveis linguísticas através da utilização de funções de pertinência que classificam cada grandeza de entrada em três conjuntos *fuzzy*. O universo de discurso estabelecido compreende os valores de tensão de 0,7 a 1,1 [p. u.].

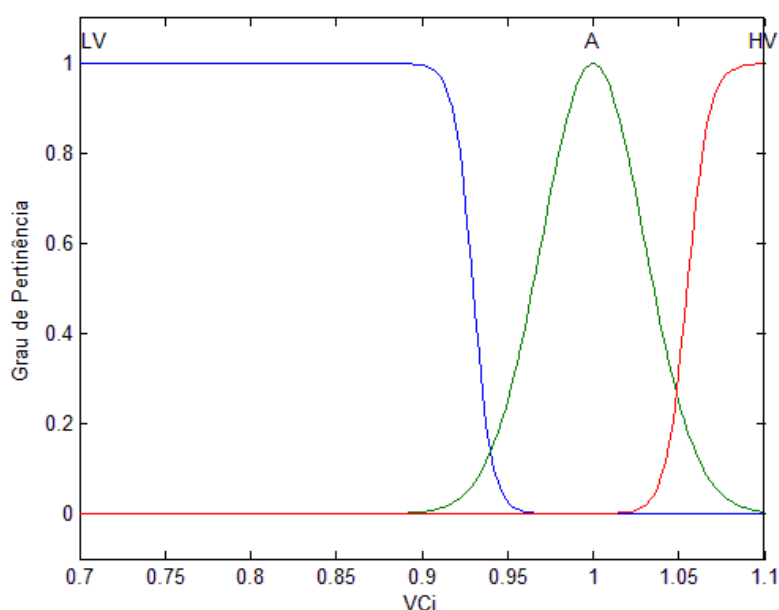


Figura 4.11 - Funções de pertinência de entrada do 1º estágio

A Tabela 4.5 apresenta o dicionário das variáveis linguísticas associadas com as funções de pertinência da Figura 4.11.

Tabela 4.5 - Dicionário das variáveis linguísticas da entrada do 1º estágio

Variável Linguística	Significado
<i>LV</i>	Perfil de tensão baixo
<i>A</i>	Perfil de tensão adequada
<i>HV</i>	Perfil de tensão elevado

Conforme visto pela Figura 4.11, as funções de pertinência dividem o universo de discurso da variável  $V_{C_i}$  em três conjuntos *fuzzy*. Para um dado valor de tensão em uma barra de carga, este recebe um valor de pertinência, de 0 a 1, para cada uma das três funções de pertinência estabelecidas, o qual representa o nível de



verdade da informação de entrada com a respectiva função de pertinência. Ou seja, as variáveis de entrada, inicialmente representadas por um valor numérico, são transformadas em valores linguísticos, os quais expressam o significado da grandeza em termos linguísticos. Isto caracteriza a etapa de fuzzificação, fornecendo, desta maneira, uma informação mais adequada sobre a situação das tensões dos barramentos da subárea de interesse.

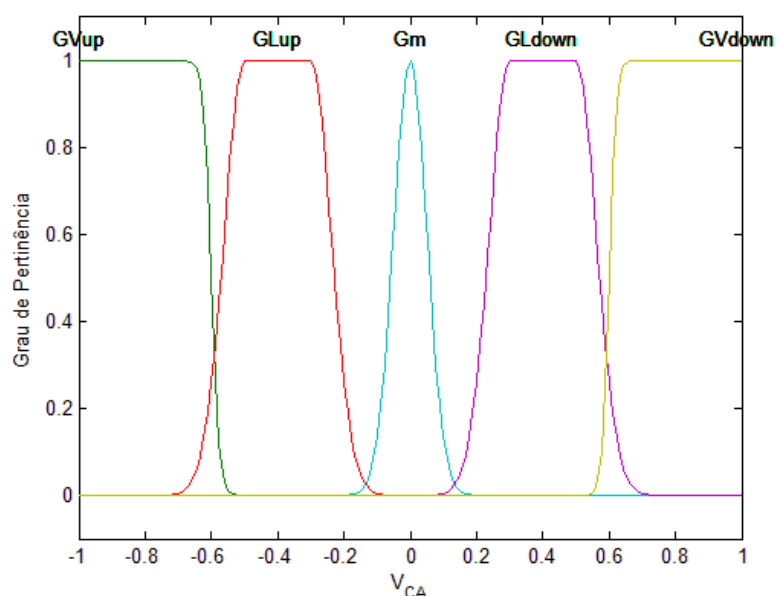


Figura 4.12 - Funções de pertinência associadas a saída do 1º estágio

Quanto à variável de saída,  $V_{CA}$ , foram definidas cinco funções de pertinência, conforme apresenta a Figura 4.12, para representar o universo de discurso. A cada função de pertinência foram associadas variáveis linguísticas que descrevem a ação necessária a ser tomada pelo grupo de elementos de controle da subárea.

Tabela 4.6 - Dicionário de ações associadas a saída do 1º estágio

Variável Linguística	Ação Necessária
$GV_{up}$	Aumento elevado de tensão
$GL_{up}$	Aumento moderado de tensão
$G_m$	Manter a tensão
$GL_{down}$	Diminuição moderada de tensão
$GV_{down}$	Diminuição elevada de tensão

As variáveis linguísticas e respectivas ações, apresentadas na Tabela 4.6, são resultado da etapa de inferência *fuzzy*, a qual se baseia no conjunto de regras difusas estabelecido heurísticamente para cada subárea. As funções de pertinência

da Figura 4.12, por sua vez, juntamente com a agregação das respostas obtidas por cada regra determinam a saída do primeiro estágio em valores nítidos, caracterizando-se a etapa de defuzzificação.

Após a definição das funções de pertinência que mapeiam tanto as variáveis de entrada quanto as variáveis de saída do sistema, constituindo as etapas de Fuzzificação e Defuzzificação, faz-se necessário criar o enlace entre as informações de entrada e saída. Para isto são definidos os conjuntos de regras difusas do tipo “SE-ENTÃO” para cada subárea. Estes aplicam o conhecimento humano sobre as variáveis e determina os valores de saída do primeiro estágio de controle, através das operações com conjuntos *fuzzy* relacionadas com os termos linguísticos, conforme apresentado no Capítulo 3.

Em geral, a quantidade de variáveis de entrada e funções de pertinência a elas associadas determinam o número de regras necessárias para cobrir todas as combinações possíveis. Entretanto, devido a características intrínsecas do sistema, este número pode ser consideravelmente reduzido.

Para este estágio de controle, as regras *fuzzy* foram definidas após análise dos mesmos *mode-shapes* utilizados para definição das subáreas. Disto, algumas premissas foram então estabelecidas para a construção das regras:

- As barras de carga com as maiores magnitudes dentro do *mode-shape* impactam na ação de um maior número de elementos de controle dentro da subárea, no caso de violação de tensão;
- As barras de ligação do sistema, com ausência de carga, são excluídas do monitoramento de tensão;
- Para as barras que não possuem as maiores magnitudes, mas, que enfrentem problemas de tensão é associada uma saída que exija o mínimo de variação de tensão;
- Barras com grande participação no vetor tangente devem contemplar regras específicas, com propósito de manter a estabilidade do sistema;

Diante destas premissas, os sistemas de controle secundário de tensão para o primeiro estágio de controle foram construídos individualmente para cada subárea presente no sistema considerado. A Tabela 4.7 resume a quantidade de variáveis de entrada, saída e número de regras *fuzzy* utilizadas para cada sistema *fuzzy* associados às subáreas do sistema.

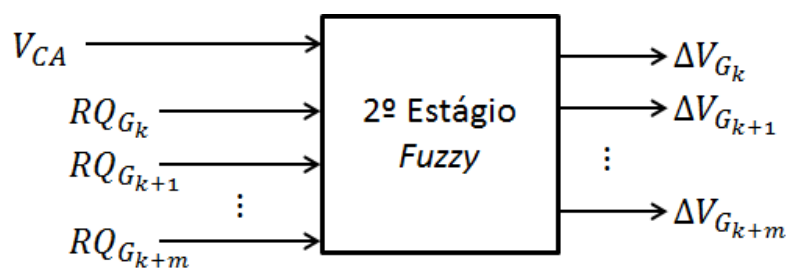
Tabela 4.7 – Síntese dos sistemas *fuzzy* para o 1º estágio

Área	Subárea	Entrada	Saída	Regras <i>Fuzzy</i>
1	A	3	1	7
	B	7	1	17
	C	2	1	5
	D	2	1	7
2	A	7	1	15
	B	9	1	15
3	A	4	1	11
	B	7	1	17
	C	5	1	11

#### 4.3.2 Segundo estágio de controle

A saída do primeiro estágio de controle *fuzzy*,  $V_{CA}$ , define a necessidade e a direção da ação de controle do grupo de geradores/compensadores, com o propósito de regular a tensão das barras de carga da subárea. Entretanto, em situações de carga elevada ou carga muito baixa, os elementos de controle podem não dispor de reservas de geração de potência reativa suficiente para manter tensões adequadas nas barras de carga.

Com isto, o Segundo Estágio de Controle *Fuzzy* é responsável por verificar a disponibilidade de suporte de potência reativa por parte dos geradores e compensadores e coordenar a atuação dos mesmos. Assim, evita-se que a ação de um determinado ECT viole os próprios limites, máximos ou mínimos, de geração de potência reativa ou os limites de algum outro elemento da subárea de controle.

Figura 4.13 - Segundo estágio de controle *fuzzy*

O diagrama do segundo estágio de controle *fuzzy* proposto é ilustrado na Figura 4.13. Como já mencionado, a primeira variável de entrada deste estágio,  $V_{CA}$ , compreende a variável de saída do estágio anterior.

Quanto às demais variáveis de entrada, estas são compostas pelo percentual de geração de potência reativa disponível pelas máquinas participantes do controle de tensão da subárea, dado por  $RQ_{G_k}$ . Portanto, a informação de geração de potência reativa,  $Q_{G_k}$ , deve, primeiramente, ser transformada em um valor que retrate a relação entre a geração de potência reativa e os limites, inferior e superior, da máquina. A equação (4.4) apresenta a normalização utilizada para retratar a geração de potência reativa entre o intervalo de  $[0,1]$ .

$$RQ_{G_k} = \frac{Q_{G_k} - Q_{k_{\min}}}{Q_{k_{\max}} - Q_{k_{\min}}} \quad (4.4)$$

onde  $RQ_{G_k}$  é a reserva de potência reativa,  $Q_{G_k}$  é a geração atual de potência reativa,  $Q_{k_{\min}}$  e  $Q_{k_{\max}}$  são os limites de geração de potência reativa.

Da equação (4.4), verifica-se que a variável de entrada assumirá valores próximos de “0” quando a máquina “ $k$ ” estiver gerando potência reativa próxima ao limite inferior. Por outro lado, assumirá valores próximos a “1” quando estiver alcançando o limite superior de potência reativa. Esta informação impactará nas ações de controle da subárea, pois, para qualquer um dos extremos, medidas preventivas devem ser tomadas para evitar a perda da máquina por infringir limites operativos de geração de potência reativa.

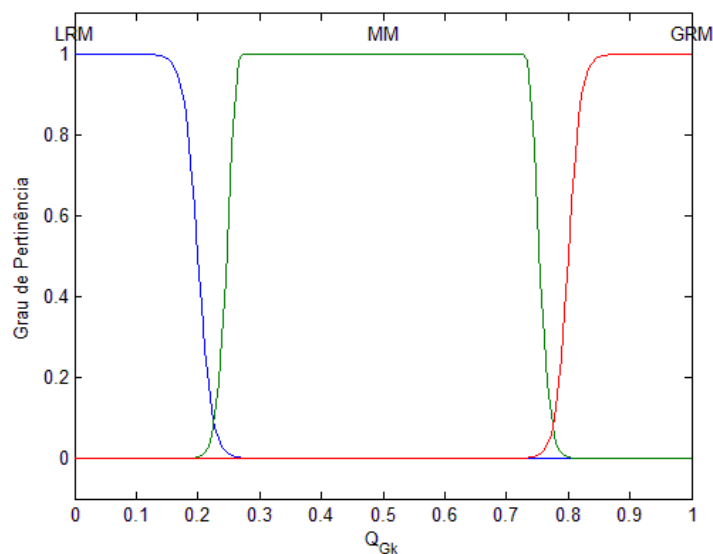


Figura 4.14 - Funções de pertinência para as entradas de reserva de potência reativa do 2º Estágio

Como mostra a Figura 4.14, foram definidas três funções de pertinência para classificar as variáveis de entrada, individualmente. A Tabela 4.8 apresenta os termos linguísticos associados com as funções de pertinência da figura e os seus respectivos significados.

Tabela 4.8 - Dicionário das variáveis linguísticas da entrada do 2º estágio

Variável Linguística	Significado
<i>LRM</i>	Baixa reserva de potência reativa
<i>MM</i>	Moderada reserva de potência reativa
<i>GRM</i>	Alta reserva se potência reativa

Diferentemente do estágio anterior, o segundo estágio de controle *fuzzy* possui “*k*” saídas, Figura 4.13, onde “*k*” é o número de elementos de controle disponíveis na subárea. As variáveis de saída,  $\Delta V_{G_k}$ , por sua vez, representam, individualmente, a variação da referência de tensão a ser aplicada à estes elementos. Nota-se, no entanto, que apesar da malha de controle conter múltiplas saídas, estas não estão diretamente correlacionadas. As correlações e coordenações das máquinas são realizadas internamente através do conjunto de regras difusas, o qual determina a necessidade da ação em conjunto.

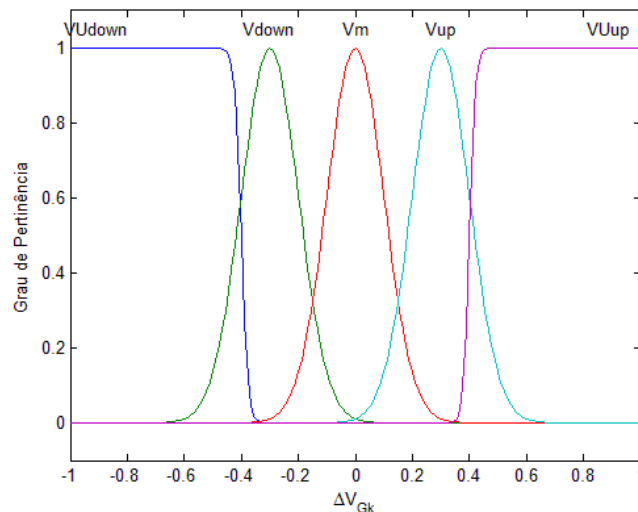


Figura 4.15 - Funções de pertinência associadas a saída do 2º estágio

Como os elementos considerados para o controle de tensão de uma subárea pode compreender tanto geradores quanto compensadores síncronos, tendo o primeiro uma capacidade de geração de potência reativa, em geral, maior que o segundo, utilizou-se um conjunto de funções de pertinência diferentes para cada um.

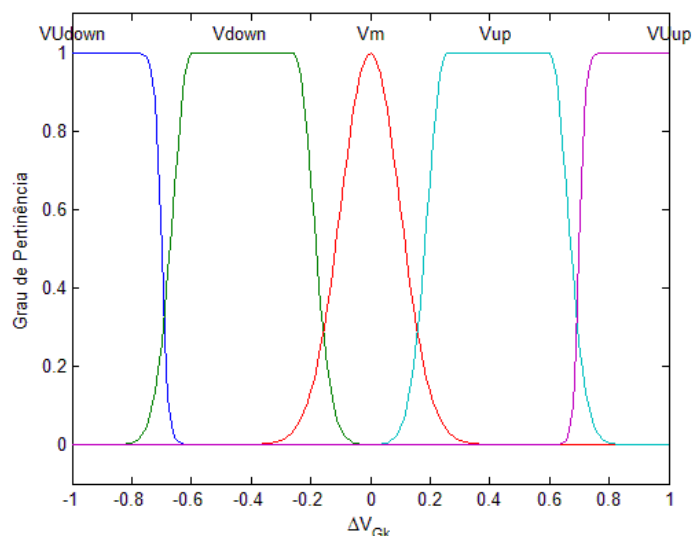


Figura 4.16 - Funções de pertinência associadas a saída do 2º estágio

A Figura 4.15 apresenta as funções definidas para aplicação sobre compensadores síncronos, já a Figura 4.16 ilustra as funções definidas para o controle dos geradores. Verifica-se que as funções diferem quanto ao domínio dos conjuntos *fuzzy* dentro do universo de discurso. Aos geradores, por possuírem maior disponibilidade de reserva de potência reativa, são permitidas excursões maiores na variação da referência de tensão do mesmo.

Quanto ao significado de cada variável linguística associado às funções, a Tabela 4.9 apresenta a relação entre as variáveis e a ação imposta ao elemento de controle.

Tabela 4.9 - Dicionário de ações associadas a saída do 2º estágio

Variável Linguística	Ação do elemento de controle
$V_{Udown}$	Elevada redução de tensão
$V_{down}$	Moderada redução de tensão
$V_m$	Manter a tensão
$V_{up}$	Moderado aumento de tensão
$V_{Uup}$	Elevado aumento de tensão

Semelhante ao estabelecido no estágio anterior, as regras *fuzzy* estabelecidas no segundo estágio de controle foram definidas com base nas informações do *mode-shape* utilizado para determinação das subáreas.

No entanto, no 1º estágio, a saída definia apenas o grau de necessidade de controle baseado nas informações de tensão das barras de carga. Por outro lado, neste 2º estágio, as regras devem cumprir as ações requeridas pelo estágio anterior,

mantendo a coordenação na ação dos geradores/compensadores com o objetivo de não violar os limites de geração de potência reativa de um ou outro elemento. Na prática isso se traduziria em uma operação anormal da máquina, além de redução da margem de estabilidade do sistema. Para tanto, a base de regras *fuzzy*, para este estágio, foi construída nas seguintes premissas:

- As barras de geração com as maiores magnitudes dentro do *mode-shape* são as destinadas a dar a maior contribuição com o controle;
- Se as máquinas com os maiores módulos no *mode-shape* não possuírem reserva de potência reativa suficiente para o controle, as demais máquinas do sistema não devem atuar;
- Os compensadores síncronos com magnitudes no *mode-shape* muito semelhante à de um gerador, da mesma subárea, devem assumir a mesma direção de controle do gerador. Ou seja, caso seja designado uma ação de elevação de tensão para o gerador, o compensador síncrono deve, também, elevar a tensão, de modo a não infringir o limite inferior de geração de potência reativa;
- Caso as tensões da subárea estejam adequadas, indicando a não necessidade de ação de controle, as regras devem direcionar a uma atuação que recupere ao menos uma parcela da reserva de potência reativa da subárea;

Desta forma, os sistemas de controle secundário de tensão para o segundo estágio de controle foram construídos individualmente para cada subárea presente no sistema considerado. A Tabela 4.10 resume a quantidade de variáveis de entrada, saída e número de regras *fuzzy* utilizadas para cada sistema *fuzzy* associados às subáreas do sistema.

Tabela 4.10 – Síntese dos sistemas *fuzzy* para o 2º estágio

Área	Subárea	Entradas	Saídas	Regras <i>Fuzzy</i>
1	A	7	6	47
	B	9	8	149
	C	3	2	26
	D	5	4	85
2	A	7	6	68
	B	10	9	38

Área	Subárea	Entradas	Saídas	Regras <i>Fuzzy</i>
3	A	4	3	17
	B	7	6	266
	C	5	4	38

Em linhas gerais, como o sistema de controle secundário com lógica *fuzzy* proposto funciona como uma malha de controle aplicada sobre o sistema, o mesmo irá deixar de atuar somente quando as condições do sistema estiverem normalizadas ou os elementos de controle da subárea não possuírem mais recursos de suporte de potência reativa. Caso contrário, o sistema de controle agirá sobre o sistema na tentativa de corrigir as violações de tensão e, se possível, melhorar a disponibilidade de reserva de geração de potência reativa.

#### 4.4 Fluxogramas de desenvolvimento e operação do Sistema *Fuzzy*

De maneira a resumir o processo de desenvolvimento dos sistemas de controle *fuzzy* proposto nesta dissertação, apresenta-se o fluxograma representativo da metodologia exposta nos itens precedentes.

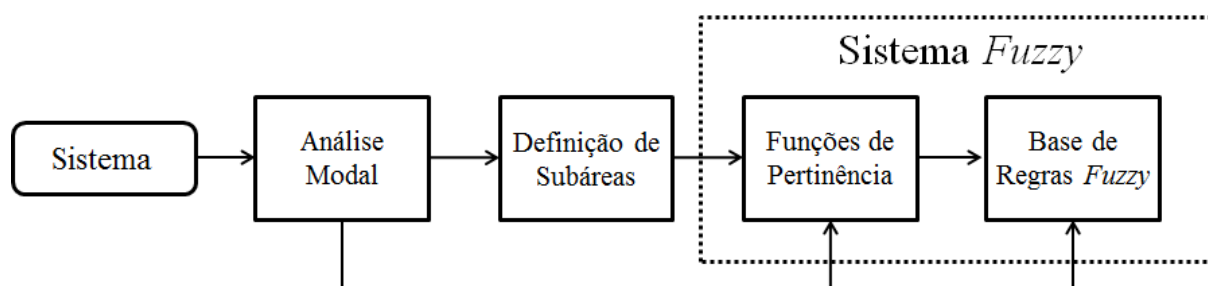


Figura 4.17 - Fluxograma de desenvolvimento dos Sistemas *Fuzzy*

A partir de um sistema de estudo definido, aplica-se a técnica de análise modal à matriz jacobiana expandida. Disto, definem-se as subáreas de controle de tensão, as quais serão aplicadas sistemas de controle *fuzzy* individuais e específicos. Posteriormente, com base nas subáreas e nas informações obtidas pela análise modal, determinam-se as funções de pertinência associadas às variáveis de entrada e saída para cada estágio de controle, conforme estabelecido pelos itens 4.3.1 e 4.3.2. Paralelamente a isto, criam-se as bases de regras *fuzzy* responsáveis por traduzir o conhecimento humano em ações de controle.

Quanto à operação dos sistemas de controle *fuzzy* desenvolvidos, apresenta-se, na Figura 4.18, o fluxograma operativo.



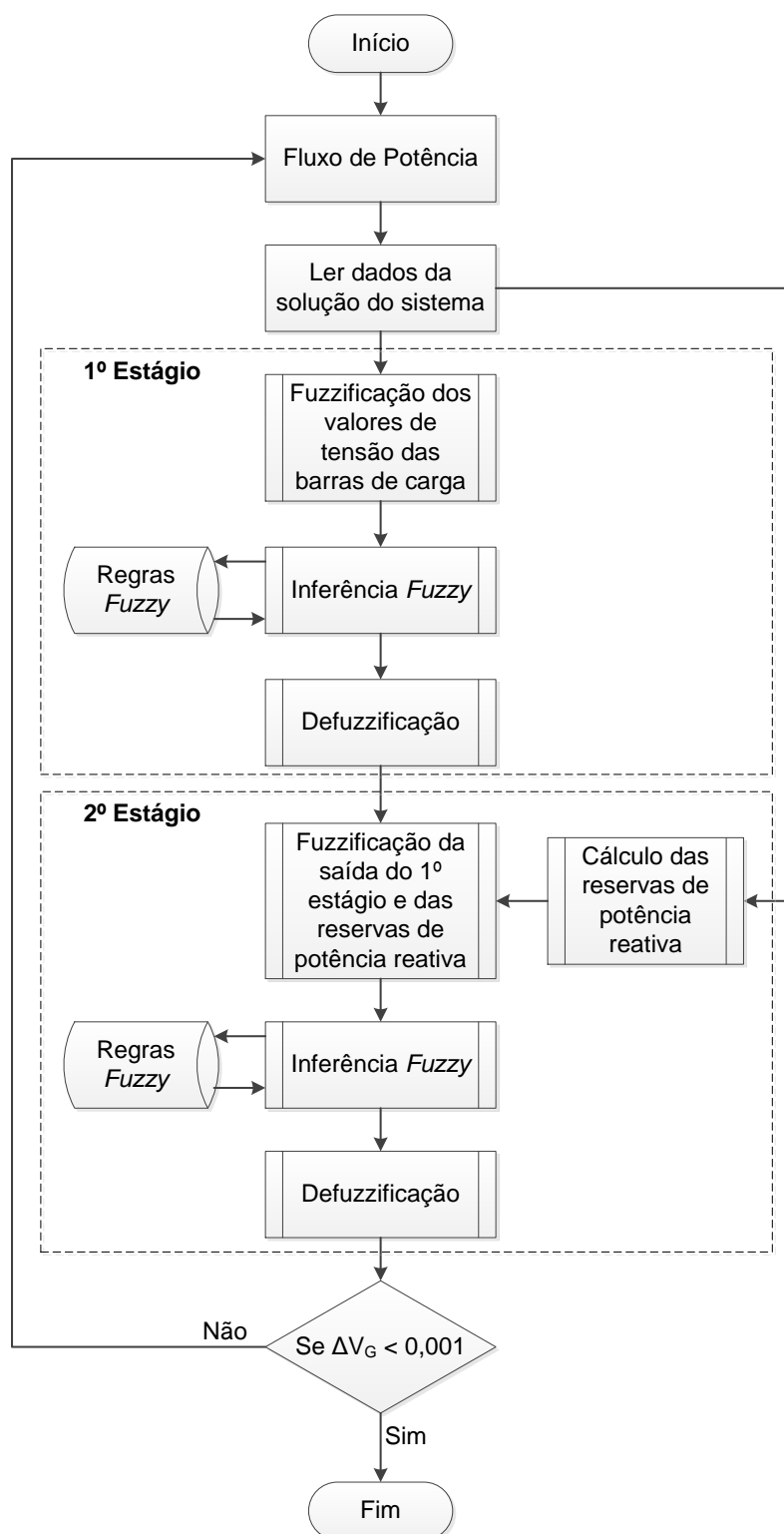


Figura 4.18 - Fluxograma de operação do Sistema *Fuzzy*

O conjunto formado pelo primeiro e segundo estágio, e que corresponde ao sistema de controle desenvolvido, será denominado, a partir daqui, de “Controle Secundário de Tensão por Lógica *Fuzzy*” e identificado pelo termo “CST-Fuzzy”.

## CAPÍTULO 5

### 5 RESULTADOS

De forma a validar a metodologia de controle de tensão secundário, utilizando-se sistemas de inferência *fuzzy* com o apoio de análise modal para definição de regras e subáreas de controle, conforme proposto no Capítulo 4, apresenta-se, no presente capítulo, os resultados obtidos sob o sistema acadêmico IEEE 118. Com o fim de aplicar o controle *fuzzy* sob condições de violação de tensão, modificou-se a carga do sistema original em pontos específicos, de modo a obter diferentes configurações.

Inicialmente é apresentada uma situação simples de violação de tensão, no qual o problema é eliminado com a atuação de um controle não coordenado. Verifica-se, para o caso, que o controle retira a violação de tensão, porém prejudica a margem de estabilidade de tensão.

Posteriormente são apresentados os resultados obtidos com a utilização do sistema de Controle Secundário de Tensão por Lógica *Fuzzy*, onde se verifica a melhoria do perfil de tensão de toda a subárea, além da manutenção da margem de carga do sistema, sendo este um subproduto da metodologia proposta. Para isto, desenvolveu-se um programa em MatLab que incorpora a metodologia apresentada.

Por fim, de maneira a manter coerência e facilitar a posterior comparação dos resultados, as nomenclaturas das subáreas, delimitadas pela análise modal e descritas na metodologia, serão utilizadas durante a discussão dos resultados.

#### 5.1 Sistema sem a coordenação de controle

O controle descoordenado de tensão, com o objetivo exclusivo de reestabelecer as tensões dos barramentos dentro de limites de operação é, em alguns casos, suficiente para atender esta premissa. Com o propósito de ilustrar esta situação, criou-se um sistema em que se procurou sobrecarregar uma subárea específica até que houvesse, ao menos, uma violação de tensão em um dos barramentos de carga. Disto, adotou-se a Subárea 2A como candidata ao aumento

de carga de acordo com as proporções apresentadas pela Tabela 5.1. Para facilitar o endereçamento do problema, este sistema será citado como “Caso base”.

Tabela 5.1 - Proporções de aumento de carga para o Caso base

Proporção [%]	Nº das Barras
100	11
120	2, 3, 117

Destas premissas, a Figura 5.1 ilustra uma situação de violação de tensão, onde os requisitos de operação foram atendidos, unicamente, através da elevação das tensões terminais dos geradores da Subárea 2A. A curva em “azul” representa a situação antes da atuação do controle de tensão, e a curva em “verde” o perfil de tensão após o controle não coordenado de tensão. Em função da dimensão do sistema analisado, optou-se por apresentar o perfil de tensão somente dos barramentos que compõem a Subárea 2A e algumas barras de fronteira.

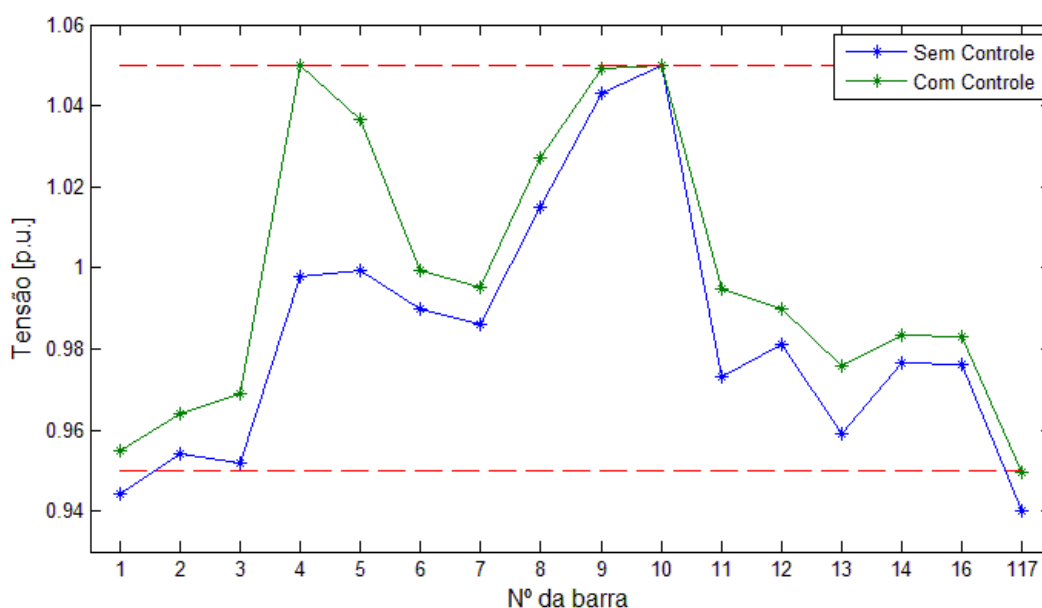


Figura 5.1 - Perfil de tensão da Subárea 2A sem coordenação dos ECT

A Subárea 2A é composta de cinco elementos de controle de tensão, sendo três geradores e dois compensadores síncronos, além de possuir sete barras de carga. A Tabela 5.2 apresenta a descrição das barras que compõe a subárea e algumas das barras de fronteira desta.

Tabela 5.2 - Descrição dos barramentos analisados para o Caso base

	<b>Carga</b>	<b>Compensadores síncronos</b>	<b>Geradores</b>
<b>Subárea 2A</b>	2, 3, 5, 7, 11, 13,117	1, 6	4, 8, 12
<b>Fronteira</b>	9, 14, 16	-	10

Conforme a Figura 5.1, verifica-se que a tensão terminal do gerador 4 encontra-se no limite superior de operação. Além disso, o gerador da barra 8, que também contribuiu com a elevação da tensão na barra 117, está contribuindo com uma tensão elevada no barramento 9. Estes fatores, no caso de um novo aumento de carga, tornam-se determinantes à perda do suporte de potência reativa nesta subárea. Ou seja, para qualquer aumento de carga, a tensão da barra 117 infringirá, novamente, o limite inferior de tensão, o que exigirá elevação de tensão por parte dos geradores. Estes, conseqüentemente, atingirão os limites máximos de tensão e deixarão de contribuir para o controle da potência reativa da subárea.

A análise da margem de carga do sistema, considerando-se tanto a situação com as tensões violadas quanto com o controle não coordenado, da Figura 5.1, permite verificar a adequação do controle sob o ponto de vista de estabilidade de tensão. A Tabela 5.3 apresenta os resultados para ambas as situações.

Tabela 5.3 - Margem de carga para o Caso Base

	<b>Sem Controle</b>	<b>Com Controle</b>
<b>Margem de carga [p.u.]</b>	0,7409	0,6932

Apesar da violação de tensão da barra 117 ter sido contornada pela injeção de uma maior quantidade de potência reativa, por parte dos geradores, na subárea, verifica-se que o controle de tensão implicou em um decréscimo na margem de estabilidade de tensão do sistema. Isto está relacionado com falta de coordenação entre os elementos de controle presentes na subárea.

No Caso Base, o gerador presente na barra 12 está com o limite de geração de potência reativa violado em função da elevação de carga na barra 117. Desta forma, sua tensão terminal, antes controlada, varia conforme o fluxo de potência reativa no sistema. Os compensadores síncronos, barras 1 e 6, estão na mesma situação. No entanto, durante o controle de tensão, descoordenado, as violações de

geração de potência reativa de alguns elementos de controle não são corrigidas, reduzindo-se a injeção de potência reativa na subárea ao custo da perda de margem de carga. A Tabela 5.4 apresenta a situação dos geradores e compensadores após a atuação do controle de tensão sem a coordenação.

Tabela 5.4 - Situação dos ECT após o controle não coordenado

Barra	V [p.u.]	$Q_G$ [Mvar]	$Q_{G_{min}}$ [Mvar]	$Q_{G_{max}}$ [Mvar]
01	0,955	1,1	-5,0	15,0
04	1,050	247,3	-300,0	300,0
06	1,000	-13,0	-13,0	50,0
08	1,027	27,1	-300,0	300,0
12	0,990	56,1	-35,0	120,0

Verifica-se, que o compensador da barra 6 manteve a violação do limite mínimo de geração de potência reativa após o controle. Além disso, o gerador da barra 4, o qual possui grande influência sobre a subárea, está com a reserva de suporte de potência reativa quase esgotada, pois o mesmo opera próximo do limite máximo de geração de potência reativa.

## 5.2 Controle secundário de tensão por lógica *fuzzy*

As conclusões obtidas pela a análise da Figura 5.1 deixam evidente a necessidade de um sistema coordenado de controle de tensão, o qual deve corrigir as violações de tensão das barras de carga e, ao mesmo tempo, gerenciar a reserva de geração de potência reativa das máquinas presentes do sistema.

Desta forma, serão apresentadas, a seguir, algumas situações contendo violações de tensão no sistema em estudo e a posterior correção através da implementação do Controle Secundário de Tensão por Lógica *Fuzzy*.

### 5.2.1 Caso base

Considerando-se o mesmo caso de violação de tensão apresentado anteriormente, a Figura 5.2 apresenta as tensões dos barramentos da Subárea 2A resultantes do processo de controle do CST-*Fuzzy*.

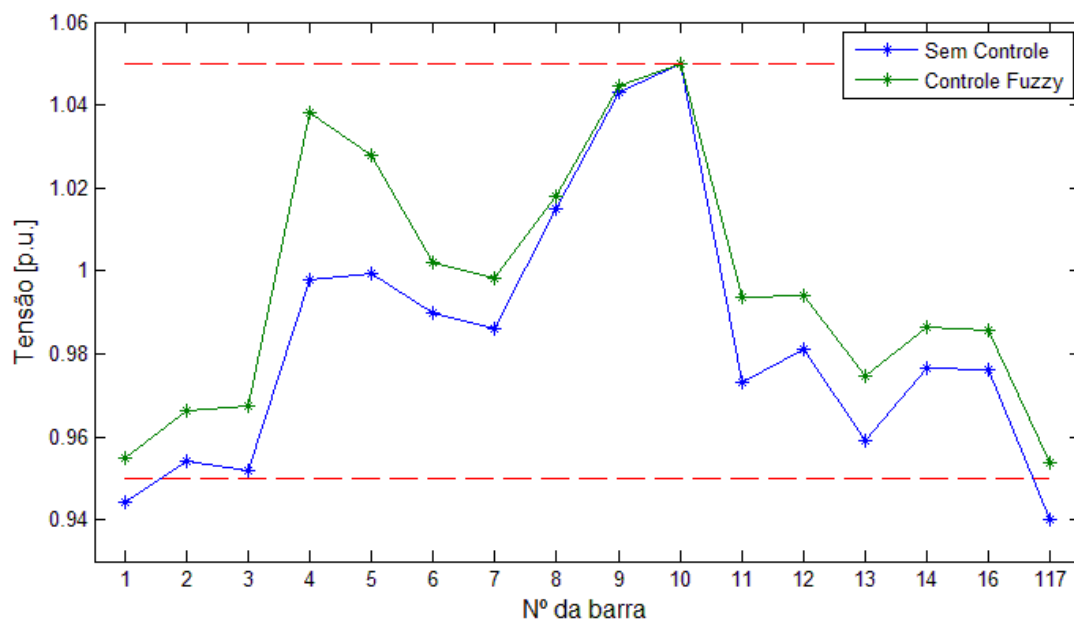


Figura 5.2 - Perfil de tensão da Subárea 2A com CST-Fuzzy

Observa-se que o perfil de tensão de toda a subárea sofre uma elevação, comparando-se os casos com a violação de tensão e a situação pós-controle. Os Barramentos 1 e 117, que antes possuíam valores de tensão abaixo de 0,95 [p.u.], resultaram em tensões dentro dos limites de operação após o controle.

Apesar do perfil de tensão da Subárea 2A obtido com o CST-Fuzzy ser muito semelhante ao apresentado na Figura 5.1, verifica-se, pela Tabela 5.5, que os ECT do sistema, após o controle *fuzzy*, apresentam reservas de geração de potência reativa muito superiores aos resultados obtidos na Tabela 5.4. Isto permite uma operação mais flexível do sistema diante de novas variações de carga.

Tabela 5.5 - Situação dos ECT com o CST-Fuzzy

Barra	V [p.u.]	$Q_G$ [Mvar]	$Q_{G_{min}}$ [Mvar]	$Q_{G_{máx}}$ [Mvar]
01	0,955	2,1	-5	15
04	1,038	188,4	-300	300
06	1,002	4,9	-13	50
08	1,018	3,2	-300	300
10	1,050	-56,2	-147	200
12	0,994	94,6	-35	120

Ademais, a margem de estabilidade de tensão foi preservada através da coordenação dos elementos de controle, como mostra a Tabela 5.6. Observa-se que não houve melhoria da margem de carga do sistema devido à atuação dos ECT.

Porém, ainda assim as ações de controle aplicadas localmente à subárea não depreciaram a estabilidade do sistema, como o caso anterior.

Tabela 5.6 - Comparação da margem de carga do sistema com o CST-*Fuzzy*

	<b>Caso Base</b>	<b>CST-<i>Fuzzy</i></b>
<b>Margem de carga [p.u.]</b>	0,7409	0,7413

Em situações de carga elevada e com presença de violações de tensão, como o caso apresentado, espera-se que as tensões sejam corrigidas sem que haja prejuízo na segurança operativa do sistema. Portanto, conforme o objetivo estabelecido, estes aspectos foram atendidos através da metodologia de controle proposta.

A análise do vetor tangente para o ponto de colapso de tensão apresenta os resultados dados pela Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Vetor tangente para o Caso base no ponto de colapso

<b>Índice Vetor Tangente (%)</b>	<b>N° da Barra</b>
<b>100,00</b>	10
<b>97,69</b>	9
<b>96,60</b>	1
<b>95,56</b>	3
<b>94,82</b>	117

Observa-se, pela análise do vetor tangente, que as barras mais indicadas para o controle da injeção de potência reativa são, primeiramente, a barra de geração 10 e a barra de carga 9. Entretanto, o gerador da Barra 10 está com a tensão terminal em 1,050 [p.u.], ou seja, no limite superior da faixa operativa de tensão, além de estar eletricamente distante da barra 117, a qual apresenta violação de tensão. Portanto, é adequado que o gerador da barra 10 não aumente a sua tensão terminal. A barra 117, por sua vez, está classificado na quinta posição do VT, o que indica esta barra como uma boa candidata à injeção de potência reativa para melhoria da margem de estabilidade. Como a barra de geração 12 conecta-se diretamente com a Barra 117, aquela é quem deve elevar a tensão a fim de contribuir com o fluxo de potência reativa na barra com a violação de tensão. Conforme os resultados esboçados pela Tabela 5.5 e Tabela 5.6, a margem de carga sofreu um ligeiro aumento em função destes aspectos discutidos.

Em relação às perdas de potência ativa nos circuitos da Subárea 2A, o sistema sem a coordenação de controle resulta em 18,0 [MW] em perdas de potência ativa. Enquanto isto, comparando-se ao sistema com a atuação do Controle *Fuzzy*, este apresenta uma redução de 3,3% nas perdas de potência ativa na Subárea 2A. Nota-se, contudo, que o objetivo do CST-*Fuzzy* não é minimizar as perdas de potência ativa no sistema. Apesar disso, observa-se que a correta coordenação das ações dos ECT nas subáreas permite corrigir os problemas de violação de tensão existentes e evita que as ações de controle provoquem um aumento das perdas de potência ativa na subárea.

### 5.2.2 Caso com múltiplas violações de tensão

A seguir é considerado, para o sistema IEEE 118, um cenário de carga com múltiplas violações de tensão em subáreas distintas, com o propósito de verificar as ações de controle em conjunto pelas subáreas. Configura-se, desta forma, o Caso 1.

Para isto, efetuou-se o aumento de carga dos barramentos nas proporções apresentadas na Tabela 5.8 de modo a estressar as Subáreas 3A e 3C.

Tabela 5.8 - Proporções de aumento de carga para o Caso 1

Proporção [%]	Nº das Barras
100	35, 36, 39, 41
120	43
150	34

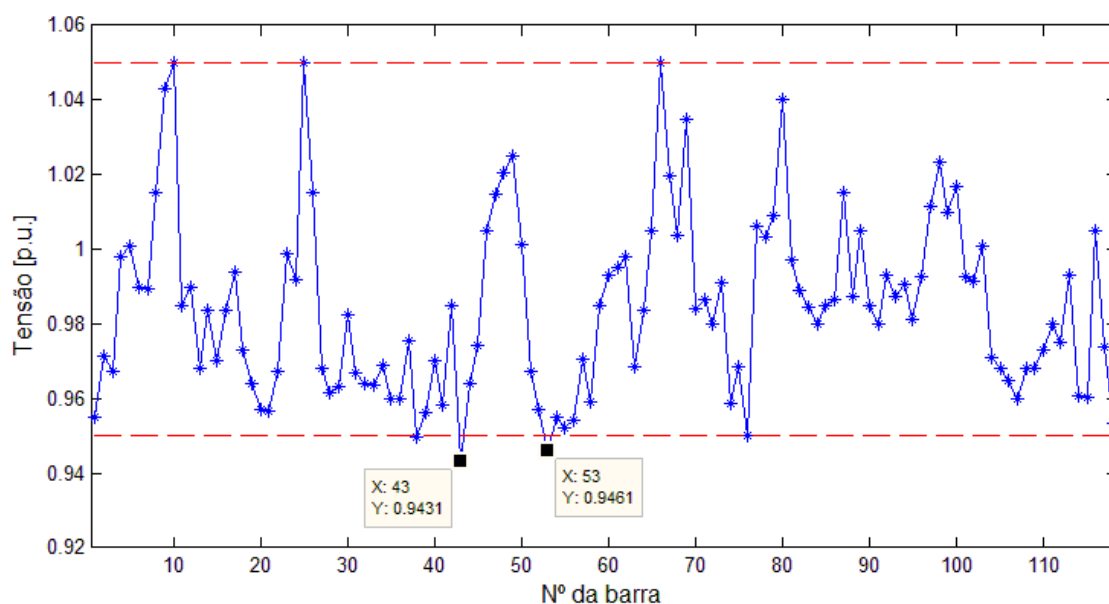


Figura 5.3 - Perfis de tensão do sistema IEEE 118 com múltiplas violações



A Figura 5.3 apresenta os perfis de tensão de todos os barramentos do sistema. Em destaque estão os barramentos 43 e 53, os quais estão com violação do limite inferior de operação do sistema, estabelecido em 0,95 [p.u.]. Estes barramentos foram agrupados às Subáreas 3C e 3A, respectivamente, conforme definido previamente.

Diante das violações de tensão apresentadas pelo sistema, foram estabelecidos dois CST-*Fuzzy* independentes, sendo um para cada subárea de controle. Cada um destes possui dois estágios de inferência *fuzzy*, como descrito pela metodologia no Capítulo 4. Ainda, para cada subárea, utilizaram-se as tensões dos barramentos de carga como variáveis de entrada do 1º estágio, e as reservas de geração de potência reativa como entradas para o 2º estágio.

Como o sistema possui um grande número de barras e, somado a isto, as ações de controle afetam, relativamente, as tensões das barras mais próximas, optou-se pela visualização gráfica das tensões das áreas sob estudo. A Figura 5.4 apresenta os perfis de tensão das barras que compõem as Subáreas 3A e 3C e algumas barras de fronteira. Similarmente aos gráficos já apresentados, a curva em “azul” evidencia as tensões para o Caso 1 com a presença das violações. Já a curva em “verde” apresenta a operação do sistema após as ações do CST-*Fuzzy*.

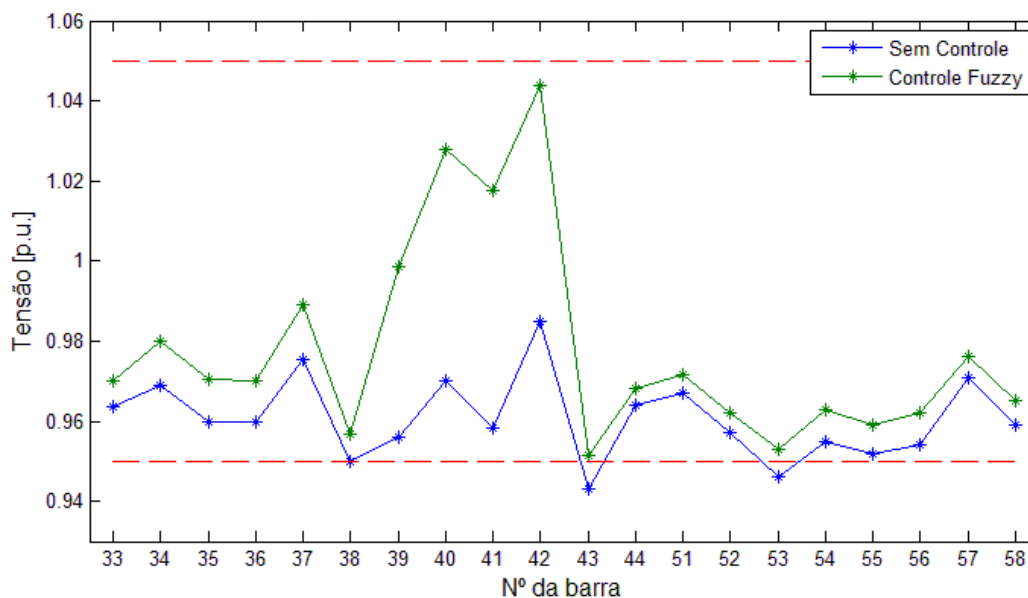


Figura 5.4 - Perfil de tensão das barras presentes nas Subáreas 3A e 3C

Verifica-se que os sistemas de controle baseados em lógica *fuzzy* e aplicados às Subáreas 3A e 3C foram suficientes para a manutenção das tensões de suas respectivas barras de carga dentro dos limites de operação. Em função do elevado aumento de carga aplicada à Subárea 3C, esta foi a que necessitou das maiores

variações de tensão por parte dos elementos de controle a fim de atender os requisitos impostos ao sistema. Além disso, a grande distância elétrica entre os geradores e as barras de carga dificulta o suporte de potência reativa. Estes aspectos podem ser claramente observados pelo gráfico da Figura 5.4.

A Tabela 5.9 mostra as tensões finais e as gerações de potência reativa para cada um dos elementos de controle de tensão disponíveis nas Subáreas 3A e 3C.

Tabela 5.9 - Situação dos ECT após o CST-*Fuzzy*

Subárea	Barra	V [p.u.]	$Q_G$ [p.u.]	$Q_{G_{min}}$ [p.u.]	$Q_{G_{máx}}$ [p.u.]
3C	34	0,980	6,4	-8	24
	36	0,970	14,5	-8	24
	40	1,028	129,9	-300	300
	42	1,044	99,2	-300	300
3A	54	0,963	14,0	-300	300
	55	0,959	-0,2	-8	23
	56	0,962	14,4	-8	15

A análise dos ECT após a atuação do sistema CST-*Fuzzy* evidencia o gerenciamento das reservas de geração de potência reativa do sistema, principalmente das unidades geradoras, o qual favorece a operação segura do sistema na eminência de novas variações de carga nas subáreas.

Quanto à margem de estabilidade de tensão, esta permaneceu inalterada após a atuação coordenada realizada pelo controle *fuzzy*. Logo, comprovando-se a manutenção da segurança operativa do sistema.

Tabela 5.10 - Margem de carga do sistema para o Caso 1

	Sem Controle	CST- <i>Fuzzy</i>
Margem de carga [p.u.]	0,6955	0,6992

A Tabela 5.11 apresenta as cinco primeiras barras com as maiores magnitudes para o VT, calculado no ponto de colapso de tensão do sistema.

Tabela 5.11 - Vetor tangente para o Caso 1 no ponto de colapso

Índice Vetor Tangente (%)	Nº da Barra
100,00	41

<b>Índice Vetor Tangente (%)</b>	<b>N° da Barra</b>
<b>99,36</b>	40
<b>96,65</b>	39
<b>85,29</b>	35
<b>85,06</b>	36

Similarmente ao obtido para o caso anterior, o vetor tangente para o Caso 1 apresenta, nas primeiras posições, os barramentos da Subárea 3C como candidatas à injeção de potência reativa. Conforme se observou pela grande necessidade de elevação de tensão desta subárea (Figura 5.4), estes barramentos são os mais afetados pelo aumento de carga no sistema. O pequeno aumento na margem de carga do sistema é devido a manutenção da geração de potência reativa das máquinas da subárea.

### 5.2.3 Caso com violações de tensão opostas

Com o objetivo de demonstrar a atuação do sistema de Controle Secundário de Tensão por Lógica *Fuzzy* em condições de violação de tensão dos limites inferiores e superiores, simultaneamente, além de verificar a influência entre subáreas de controle vizinhas, aumentou-se as cargas de barras específicas da Subárea 2A. A Tabela 5.12 apresenta as proporções de aumento de carga em cada barra, para que fosse forçada a violação do limite inferior de tensão. Em contrapartida, adicionaram-se elementos shunt de 170 [Mvar] em todos os barramentos de carga da Subárea 2B com o fim de criar uma situação de violação do limite superior de tensão.

Tabela 5.12 - Proporções de aumento de carga para o Caso 2

<b>Proporção [%]</b>	<b>N° das Barras</b>
<b>100</b>	11
<b>120</b>	2, 3, 117

Para facilitar a visualização das violações de tensão presentes no sistema, os perfis de tensão das Subáreas 2A e 2B, bem como de algumas barras de fronteira, são apresentados separadamente, através da Figura 5.5 e Figura 5.6, respectivamente.

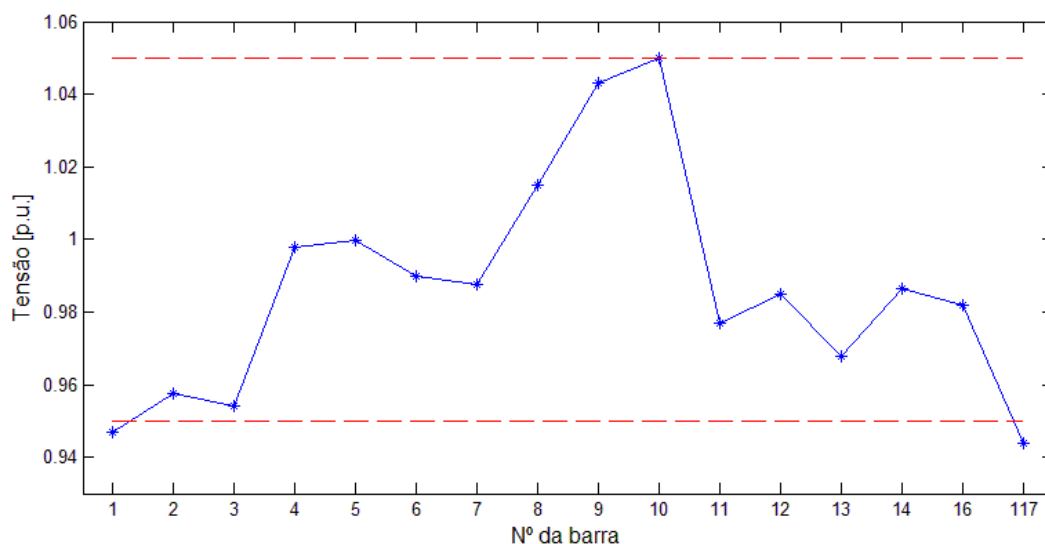


Figura 5.5 - Perfil de tensão da subárea 2A para o Caso 2

Na Figura 5.5, a qual expõe os perfis de tensão da Subárea 2A, observa-se que o Barramento 1, o qual corresponde a uma barra com compensador síncrono, está com a tensão abaixo do limite inferior, assim como a barra de carga 117.

Na Figura 5.6, por sua vez, pode-se identificar que esta subárea possui, em geral, um perfil de carga muito mais elevado que a Subárea 2A em função dos elementos shunt. Além disso, a Barra 21 está violando o limite superior de tensão.

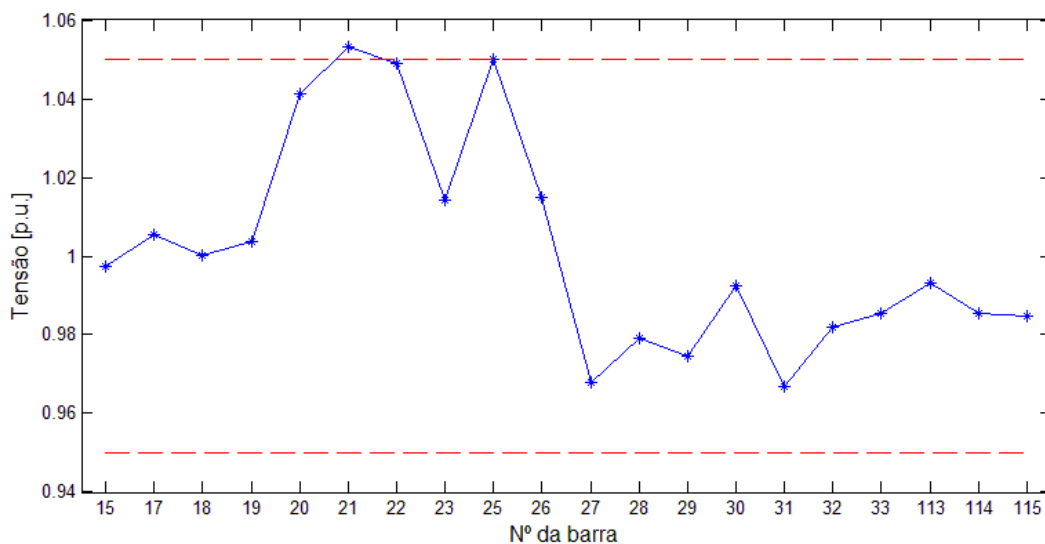


Figura 5.6 - Perfil de tensão da subárea 2B para o Caso 2

Diante deste cenário de violações de tensão em sentidos opostos e contidas em subáreas distintas, porém, vizinhas, procura-se observar a existência de conflitos de ações de controle entre as subáreas, uma vez que uma está com deficiência de suporte de potência reativa e a outra com excesso desta.

Além das barras com violações dos limites operativos de tensão já apresentadas, este cenário possui diversas máquinas com violações dos limites de

geração de potência reativa. Na Subárea 2A, o compensador da barra 1 está infringindo o limite máximo de suporte de potência reativa, assim como o gerador conectado à Barra 12. Este, pela sua dimensão, é o que mais impacta na margem de carga e, portanto, deve ter seu controle de tensão restaurado. Por outro lado, na Subárea 2B, os compensadores síncronos das Barras 15, 18, 19 e 32 estão com violação do limite inferior de geração de potência reativa.

A atuação individual dos sistemas CST-*Fuzzy*, aplicados às Subáreas 2A e 2B, foram suficientes para eliminar todas as violações de tensão provocadas, propositalmente, no sistema pelo aumento de carga e inserção de elementos shunt. A Figura 5.7 e a Figura 5.8 ilustram isso.

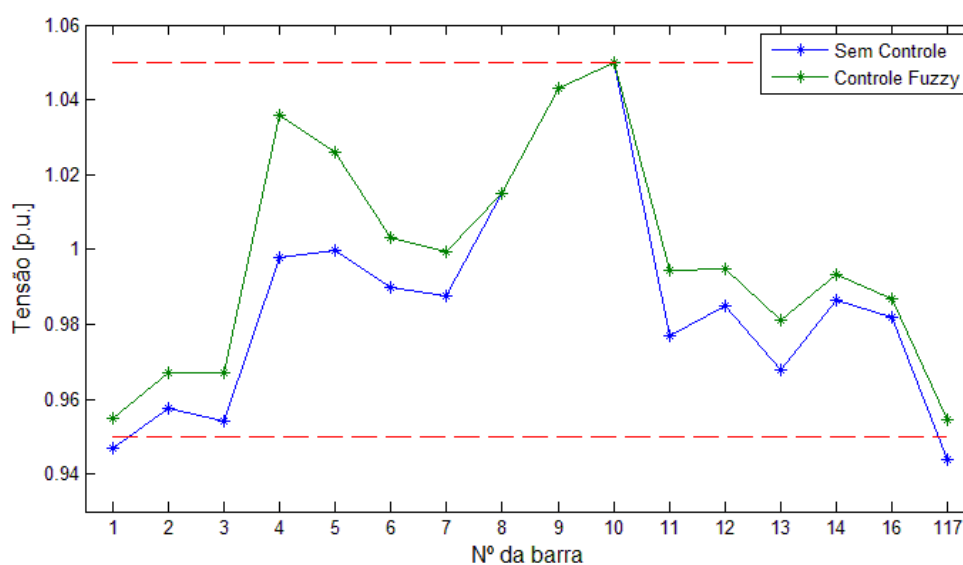


Figura 5.7 - Perfil de tensão da Subárea 2A para o Caso 2 após o CST-*Fuzzy*

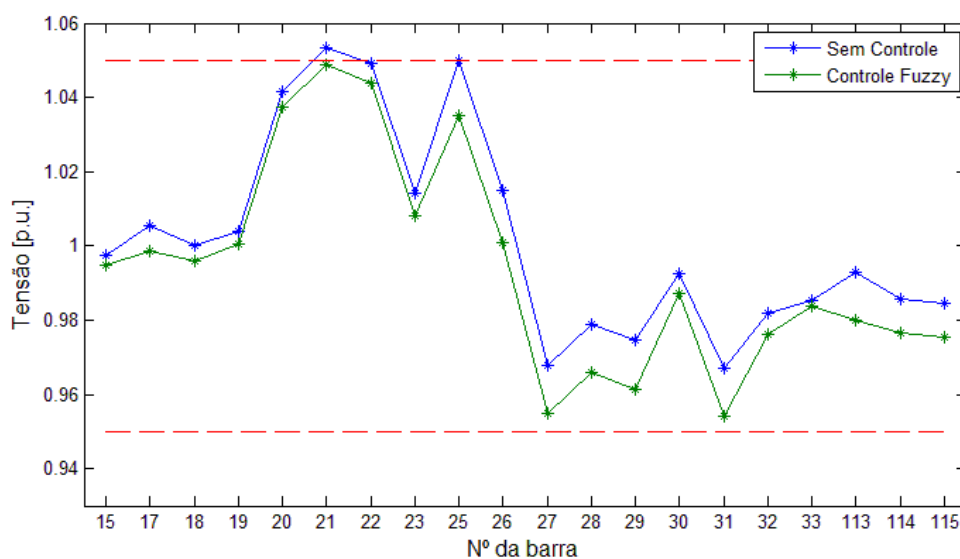


Figura 5.8 - Perfil de tensão da subárea 2B para o Caso 2 após o CST-*Fuzzy*

Em relação à Subárea 2A, os ECT tiveram suas tensões terminais elevadas a fim de melhorarem o perfil de tensão das barras de carga. Com isto, o compensador síncrono da Barra 1 deixou de violar o limite máximo de potência reativa, em virtude do aumento da geração de potência reativa dos outros elementos. Uma vez que o gerador da Barra 12 teve sua geração de potência reativa aliviada, permitiu-se, à Barra 117, a restauração da tensão dentro da faixa operativa, visto que esta é diretamente conectada ao gerador da Barra 12.

Por outro lado, a Subárea 2B possuía, inicialmente, um fluxo de potência reativa muito elevado em função da presença dos elementos shunt adicionados às barras de carga, o que elevou o perfil de tensão da subárea. Portanto, o CST-*Fuzzy* tornou-se responsável pela redução coordenada das tensões terminais dos ECT, de forma a reduzir o fluxo de potência reativa e, assim, eliminar as violações de tensão.

A Tabela 5.13 apresenta a tensão e a respectiva geração de potência reativa dos elementos de controle presentes, nas subáreas analisadas, após a operação coordenada do sistema *fuzzy*.

Tabela 5.13 - Situação dos ECT após o CST-*Fuzzy*

Subárea	Barra	V [p.u.]	$Q_G$ [Mvar]	$Q_{G_{min}}$ [Mvar]	$Q_{G_{máx}}$ [Mvar]
2A	01	0,955	2,1	-5	15
	04	1,036	182,1	-300	300
	06	1,003	9,6	-13	50
	08	1,015	-22,9	-300	300
	10	1,050	-51,0	-147	200
	12	0,995	87,6	-35	120
2B	15	0,995	-9,6	-10	30
	18	0,996	-13,3	-16	50
	19	1,000	-8,0	-8	24
	25	1,035	16,5	-47	140
	26	1,001	-0,9	-1000	1000
	27	0,955	-118,2	-300	300
	31	0,954	-70,7	-300	300
	32	0,976	10,4	14	42
	113	0,980	-56,7	-100	200

Primeiramente, verifica-se que as tensões terminais dos elementos de controle encontram-se, todas, dentro da faixa limite de operação. Ainda, para as máquinas com grande capacidade de geração de potência reativa, verifica-se que houve um gerenciamento destas reservas, os quais resultaram em valores de geração distantes dos limites operativos da máquina. Deste modo, garantindo-se este recurso para utilização posterior em eventuais variações no sistema.

Observa-se ainda que os resultados aqui obtidos, para a Subárea 3A, são muito semelhantes aos discutidos para o sistema do Caso base e resumidos pela Tabela 5.5, o qual possuía violação de tensão apenas nesta subárea. Em termos de tensões terminais das máquinas, os valores são ligeiramente próximos. Entretanto, esta diferença torna-se mais perceptível pela análise dos montantes de geração de potência reativa. No Caso base, a Subárea 3A contribuía com a geração de 293,6 [Mvar] de potência reativa para o sistema, ao passo que no Caso 2 houve uma redução de 12% na geração de potência reativa pela subárea. Destes, 74% são resultantes da diminuição de tensão da máquina na Barra 8, a qual está diretamente conectada com o Barramento 30, presente na Subárea 2B e com grande fluxo de potência reativa.

Tabela 5.14 - Margem de carga para o Caso 2

	<b>Sem Controle</b>	<b>CST-Fuzzy</b>
<b>Margem de carga [p.u.]</b>	0,8405	0,8581

Similarmente aos resultados obtidos anteriormente, a análise da Tabela 5.14 mostra que a margem de carga do sistema foi mantida com o controle *fuzzy*. Portanto, a atuação coordenada dos ECT contribuiu, não somente com a restauração das tensões dentro da faixa operativa, como também, para a manutenção da margem de segurança. Aspectos que foram vislumbrados como premissa para o desenvolvimento do CST-Fuzzy.

Tabela 5.15 - Vetor tangente para o Caso 2 no ponto de colapso

<b>Índice Vetor Tangente (%)</b>	<b>N° da Barra</b>
<b>100,00</b>	10
<b>96,53</b>	9
<b>89,88</b>	1
<b>88,92</b>	3
<b>87,22</b>	117

O vetor tangente para o ponto de colapso apresenta a mesma classificação obtida para o caso base, onde a Barra 117 representa o quinto maior elemento. Assim, conforme discutido anteriormente, o efeito das ações coordenadas dos ECT, à manutenção da injeção de potência reativa no Barramento 117, contribuiu para o pequeno aumento na margem de estabilidade de tensão.



## CAPÍTULO 6

### 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A operação de um sistema elétrico de potência enfrenta, atualmente, uma diversidade crescente de cenários de carga, os quais implicam, eventualmente, à operação do sistema em faixas de tensão que infringem os limites de tensão estabelecidos por estudos técnicos.

Aos operadores do sistema é endereçada a responsabilidade de atuar sobre o sistema diante de condições anormais. Estes definem manualmente as ações de controle de tensão, em âmbito secundário, para o fim de eliminação das violações de tensão presentes no sistema. Entretanto, estas ações exigem, inerentemente, da capacidade e conhecimento técnico do operador.

Sistemas de controle baseados na teoria de conjuntos *fuzzy* são capazes de agregar o conhecimento humano e requisitos técnicos através de simples operações matemáticas. Portanto, estes constituem uma solução para o controle de tensão, ao passo que automatiza o controle realizado pelo operador do sistema com base nos conhecimentos já utilizados pelo mesmo.

Quanto à subdivisão do sistema elétrico em áreas, ou subáreas, de controle de tensão, este permite uma melhor visualização e entendimento da influencia entre os barramentos do sistema através do desacoplamento matemático entre as barras.

Diante destes aspectos, este trabalho apresenta uma metodologia para o controle secundário de tensão com base na teoria de conjuntos *fuzzy*. Sendo esta, a responsável pela coordenação dos elementos de controle presentes no sistema. Ainda, discute-se a delimitação do sistema em subáreas de controle através da técnica de análise modal.

Sendo assim, os resultados obtidos pela metodologia proposta mostram que o *CST-Fuzzy* desenvolvido pode proporcionar bons resultados na eliminação das eventuais violações (inferior ou superior) de tensão presentes no sistema.

Além disso, através da criação de regras *fuzzy* específicas, possibilitou-se direcionar o controle de tensão com o intuito de obter um melhor gerenciamento das fontes de potência reativa disponíveis nas subáreas. Deste modo, ao final do controle, os geradores, com maiores impactos sobre a subárea, resultaram em

gerações de potência reativa distantes dos limites operativos da máquina. Esta estratégia favoreceu na manutenção da margem de estabilidade do sistema, conforme os resultados apresentados.

As ações de controle de tensão em uma determinada subárea, devido à presença de violações de tensão, inserem pouca influência a uma subárea distinta do sistema. Ainda que as subáreas sejam vizinhas, mostrou-se que a influência de uma ação de controle sobre uma subárea é pouco sensível à subárea vizinha. Isto corrobora a delimitação do sistema em subáreas de controle, uma vez que o objetivo destas é, justamente, vincular barras que possuem variações de tensão semelhantes para uma mesma variação de carga.

O sistema de Controle Secundário de Tensão por Lógica *Fuzzy* proposto possui particularidades importantes no âmbito do controle secundário de tensão que agrega o conhecimento humano sobre um determinado sistema elétrico, através de uma base de regras característica dos sistemas *fuzzy*. Além disso, a metodologia proposta incorpora a análise modal que, além de auxiliar na delimitação das subáreas, fornece subsídios para a construção de regras *fuzzy* com objetivo de coordenação dos elementos de controle de tensão.

Além disso, como a análise modal permite subdividir o problema de coordenação de controle através de subáreas de controle de tensão, a definição da base de regras é facilmente obtida. Por outro lado, sistemas de controle construídos com auxílio de RNA permitem o treinamento da rede sobre uma grande diversidade de cenários de carga e ou contingências, devido a sua característica adaptativa. No entanto, além de ignorarem o conhecimento humano sobre o sistema, as RNA exigem extensos bancos de dados e um alto esforço computacional para a obtenção da rede.

Outro aspecto importante é que, como qualquer sistema *fuzzy*, a metodologia de controle proposta permite a aplicação no âmbito de controle em tempo real, já que o mesmo fornece uma resposta sem exigir um grande esforço computacional. Isto porque uma vez definida a base de regras do CST-*Fuzzy*, a resposta do mesmo é obtida pelo simples processo de operação entre os conjuntos difusos.

Em termos de resultados, a metodologia proposta é capaz de atender os requisitos técnicos de limites operativos de tensão e, simultaneamente, preservar a margem de estabilidade de tensão através da coordenação das ações dos ECT do sistema elétrico. Entretanto, as respostas obtidas, diferentemente dos métodos clássicos de otimização, não são soluções ótimas para o sistema sob o ponto de

vista de perdas elétricas, manutenção da geração de potência reativa ou estabilidade de tensão. Porém, ainda assim, o CST-*Fuzzy* fornece facilmente resultados dentro da faixa operativa de tensão sem implicar em um grande esforço computacional, ao contrário da otimização.

## 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Seguindo o tema de controle secundário de tensão baseado em lógica *fuzzy*, existem muitas questões que abrem o caminho para novas pesquisas. Diante dos resultados apresentados, podem-se sugerir as seguintes sugestões:

- Inserção de outros elementos de controle ao Sistema Coordenado *Fuzzy*, tais como controle de TAPs de transformadores e chaveamento de bancos shunt;
- Criar base de regras que contemplem mudanças de topologia, as quais podem modificar os barramentos presentes em cada subárea;
- Considerar um módulo de previsão de carga com o objetivo de antever uma ação de controle para o sistema;
- Possibilitar a mudança de faixa de limite de tensão para operações em situações emergenciais;
- Utilizar técnicas de inteligência artificial, como redes neurais, para a construção da base de regras e das funções de pertinência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. A. P. Filho, "Representação e Avaliação do Desempenho de Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência," Tese de D.Sc, UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [2] R. T. Lima, "Redes Neurais Artificiais Aplicadas no Controle de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência," Dissertação de M.Sc, PUC - Rio, Rio de Janeiro, 2007.
- [3] A. B. Marques, "Controle Regional de Tensão Utilizando Lógica Fuzzy e Aprendizado por Reforço," Tese de D.Sc, UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- [4] H. B. Wan e A. O. Ekwue, "Artificial neural network based contingency ranking method for voltage collapse," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 22, pp. 349-354, 2000.
- [5] A. Maiorano and M. Trovato, "A neural network-based tool for preventive control of voltage stability in multi-area power systems," *Neurocomputing*, vol. 23, pp. 161-176, 1998.
- [6] K. C. Hui e M. J. Short, "Voltage security monitoring, prediction and control by neural networks," em *IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, Hong Kong, 1991.
- [7] F. Gubina e A. Gubina, "Decentralized secondary voltage control based on neural network and its effect on generator interaction," em *8th Mediterranean Electrotechnical Conference*, 1996.
- [8] A. F. Gubina, F. Gubina e R. Golob, "Intelligent coordinative voltage and reactive power control," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 23, pp. 313-321, 2001.
- [9] R. T. Lima e M. Vellasco, "Artificial Neural Networks in the Voltage Control," em *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, 2008.
- [10] Z. Gu e D. T. Rizy, "Neural networks for combined control of capacitor banks and voltage regulators in distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, n. 4, pp. 1921-1928, 1996.
- [11] M. G. dos Santos, L. S. Ochi, M. T. SCHILLING, M. B. Couto Filho e J. C. S. Souza, "Controle Ótimo de Tensão em Sistemas de Potência Utilizando Nuvens

- de Partículas,” em *XV Congresso Brasileiro de Automática*, Gramado, 2004.
- [12] G. N. Taranto, A. B. Marques e D. M. Falcão, “Coordinated Voltage Control Using Fuzzy Logic,” em *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Chicago, EUA, 2002.
- [13] A. B. Marques, G. N. Taranto e D. M. Falcão, “A supervisory knowledge-based systema for monitoring and control of regional voltage profile,” em *10th IEEE Porto Power Tech Conference*, Porto, Portugal, 2001.
- [14] V. Calderano, V. Galdi, A. Piccolo e G. Massa, “Optimal fuzzy controller for voltage control in distribution systems,” em *11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications - ISDA*, Cordoba, Espanha, 2011.
- [15] C. A. Cañizares, A. C. Z. de Souza e V. H. Quintana, “Improving continuation methods for tracing bifurcation diagrams in power systems,” em *Proceedings of the Bulk Power System Voltage Phenomena III Seminar*, Davos, Suíça, 1994.
- [16] J. P. Paul, J. Y. Leost e J. M. Tesson, “Survey of the secondary voltage control in france: Present realization and investigations,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 2, n. 2, pp. 505-511, 1987.
- [17] M. Ilic'-Spong, J. Christensen e K. L. Eichorn, “Secondary voltage controle using pilor information,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, n. 2, pp. 660-668, 1988.
- [18] R. J. G. C. da Silva, A. C. Z. de Souza, R. C. Leme e D. Sonoda, “Decentralized secondary voltage control using voltage drop compensator among power plants,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 47, pp. 61-68, 2013.
- [19] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, Palo Alto: Mcgraw Hill, 1994.
- [20] B. Gao, G. K. Morison e P. Kundur, “Voltage stability evaluation using modal analysis,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, n. 4, pp. 1529-1542, 1992.
- [21] L. C. P. da Silva, Y. Wang, V. F. da Costa e W. Xu, “Assessment of generator impact on system power transfer capability using modal participation factors,” *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 149, pp. 564-570, 2002.
- [22] D. Bedoya, M. Bedrinana, C. Castro e L. da Silva, “Power system critical areas by using sensitivities and participation factors for online applications,” em *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, Bogota, Colômbia, 2008.

- [23] R. C. Leme, A. C. Z. de Souza, J. C. S. de Souza e K. L. Lo, "Charging Reactive Power Considering System Security Aspect," *International Journal of Power and Energy Systems*, vol. 30, n. 1, 2010.
- [24] W. Rosehart, C. Canizares e V. Quintana, "Costs of voltage security in electricity markets," em *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, EUA, 2000.
- [25] A. Kargarian, M. Raoofat e M. Mohammadi, "Reactive power market management considering voltage control area reserve," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 3832-3840, 2011.
- [26] T. Menezes, L. da Silva, C. Affonso, V. da Costa e S. Soares, "MVAR management on the pre-dispatch problem for improving voltage stability margin," em *International Conference on Power System Technology - PowerCon*, 2002.
- [27] T. Menezes, L. da Silva, C. Affonso e V. da Costa, "MVAR management on the pre-dispatch problem for improving voltage stability margin," *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 151, pp. 665-672, 2004.
- [28] H. Omid, B. Mozafari, A. Parastar e M. Khaburi, "Voltage stability margin improvement using shunt capacitors and active and reactive power management," em *IEEE Electrical Power & Energy Conference - EPEC*, Montreal, Canadá, 2009.
- [29] C. Affonso, L. da Silva, F. Lima e S. Soares, "Optimal MW/MVAR dispatch and minimal load shedding strategy for improving voltage stability margin," em *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Toronto, Canadá, 2003.
- [30] C. W. Taylor, *Power System Voltage Stability*, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [31] M. Larsson, "Coordinated Voltage Control in Electric Power Systems," Doctoral Dissertation, Lund University, 2000.
- [32] R. J. G. C. da Silva, "Impedância de Compensação de Queda de Tensão em Controles Conjuntos de Tensão em Usinas - Uma Forma de Controle Secundário de Tensão Descentralizado," Tese de D.Sc., UNIFEI, Itajubá, 2007.
- [33] C. B. Gomes, "Implementação de Funções Utilizadas no Controle Coordenado de Tensão num Simulador Rápido," Tese de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.
- [34] R. M. Henriques, "Utilização de Autovalores e Autovetores no Problema de Fluxo de Potência para Determinação de Áreas de Controle de Tensão," Tese de D.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- [35] A. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, São Paulo: Edgard

Blücher, 1983.

- [36] J. H. Wilkinson, *The Algebraic Eigenvalue Problem*, Oxford: Oxford University Press, 1965.
- [37] A. C. Z. de Souza, C. A. Cañizares e V. H. Quintana, "New Techniques to Speed Up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, n. 3, pp. 1380-1387, 1997.
- [38] A. Z. de Souza, "Tangent Vector Applied to Voltage Collapse and Loss Sensitivity Studies," *Electric Power Systems Research*, vol. 47, pp. 65-70, 1998.
- [39] L. C. d. A. Ferreira, "Análise a Longo-Termo da Estabilidade de Tensão Utilizando Métodos Estáticos e um Sistema Especialista Fuzzy para Representação de Ações de Controle," Tese de D.Sc, UNIFEI, Itajubá, 2008.
- [40] G. J. Klir e B. Yuan, *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*, New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [41] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, John Wiley & Sons, 2004.
- [42] J. R. Jang, C. Sun e E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, New Jersey: Prentice-Hall, 1997.
- [43] F. W. Mohn e A. C. Z. de Souza, "Tracing PV and QV curves with the help of a CRIC continuation method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, pp. 1115-1122, 2006.
- [44] W. Pedrycz e F. Gomide, *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design*, Massachusetts: A Bradford Book, 1998.

## APÊNDICES

### A. Parametrização das funções de pertinência

As funções de pertinência (MF) possuem um papel fundamental da teoria de conjuntos *fuzzy*, pois, estabelecem o mapeamento entre as variáveis nítidas e as variáveis difusas. Este aspecto é crucial nas etapas de Fuzzificação e Defuzzificação de um Sistema de Controle *Fuzzy*. Conforme mencionado, a característica principal dos conjuntos difusos é a inexistência de fronteiras definidas, ao contrário da teoria de conjuntos convencional. Diante disso, a seguir são apresentadas as parametrizações das principais funções de pertinência documentadas na literatura [40], [41], [42] e [44].

- MF Triangular;

A parametrização das funções de pertinência do tipo triangular é representada pela equação (A.1). Para uma dada variável nítida dentro do universo de discurso X, a MF triangular é definida por três parâmetros, “a”, “b” e “c”. Logo:

$$A(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

A Figura A.1 ilustra a função de pertinência triangular.

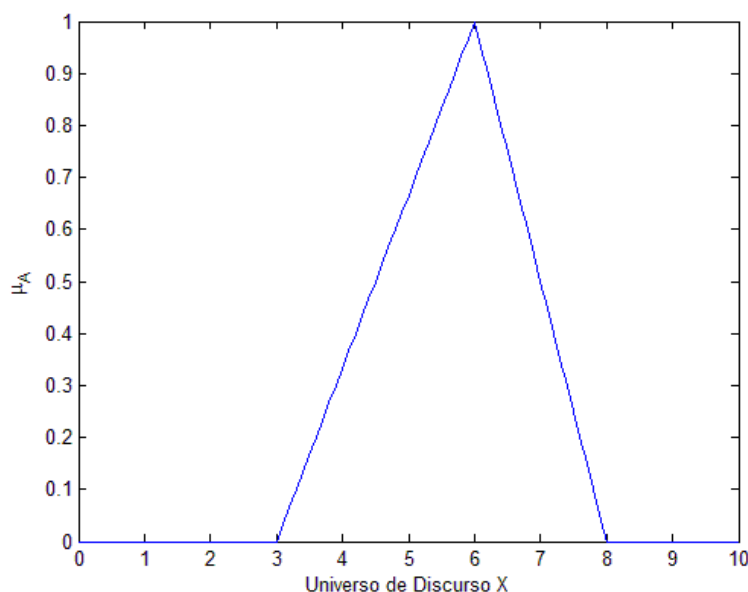


Figura A.1 - Função de pertinência Triangular



- MF Trapezoidal;

Uma alternativa à função de pertinência triangular é a MF Trapezoidal. No entanto, esta função é parametrizada através de quatro parâmetros ( $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ ), os quais definem as extremidades do polígono. Logo:

$$A(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

A Figura A.2 apresenta uma função de pertinência do tipo trapezoidal, onde os parâmetros foram definidos como:  $a = 1$ ;  $b = 5$ ;  $c = 7$  e  $d = 8$ .

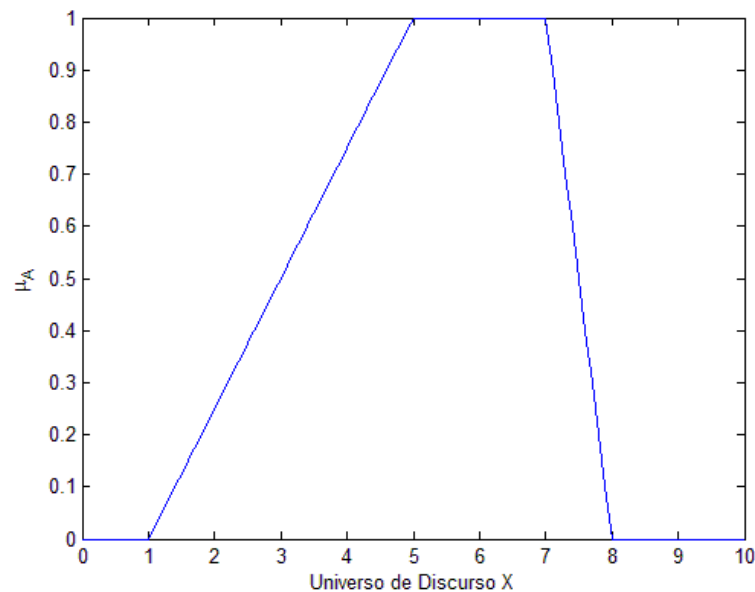


Figura A.2 - Função de pertinência Trapezoidal

Observa-se que a MF Trapezoidal reduz-se à uma função triangular caso os parâmetros  $b$  e  $c$  sejam iguais.

As funções de pertinência Triangulares e Trapezoidais podem ser utilizadas com muita eficiência em diversos tipos de processos. Entretanto, como estas MF são compostas por segmentos de reta, os pontos de transição (extremidades do polígono) fornecem graus de pertinência que variam bruscamente.

Uma alternativa para isso são as MF definidas por funções não lineares. A seguir são apresentados alguns destes tipos de funções de pertinência.

- MF Gaussiana;

A função de pertinência Gaussiana é definida por dois parâmetros ( $c$  e  $\sigma$ ) conforme mostra a equação (A.3).

$$A(x; c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-c}{\sigma} \right)^2} \quad (\text{A.3})$$

Um exemplo de um conjunto *fuzzy* definido no universo de discurso  $X$  através de uma função de pertinência do tipo Gaussiana é dado pela Figura A.3.

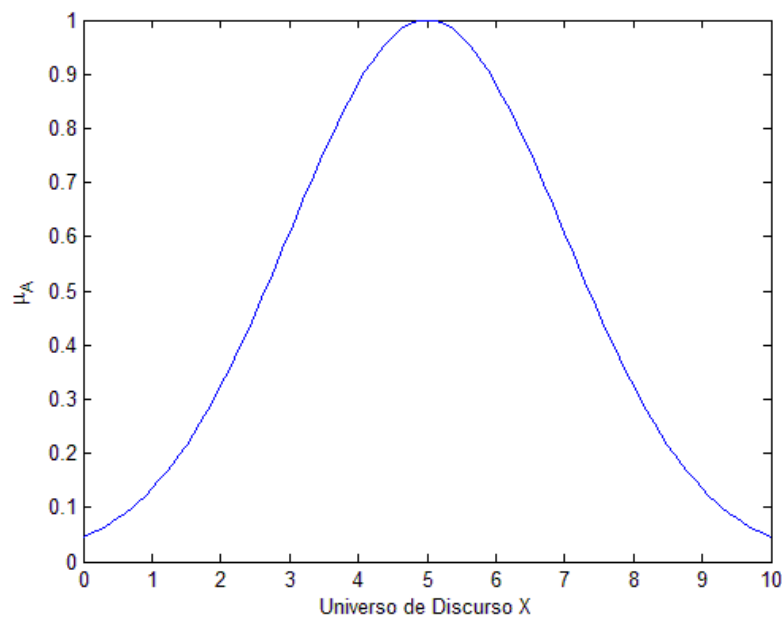


Figura A.3 - Função de pertinência Gaussiana

- MF Sino;

A função de pertinência do tipo Sino é definida por três parâmetros ( $a$ ,  $b$  e  $c$ ) e pode ser representada através da equação (A.4).

$$A(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (\text{A.4})$$

Similarmente a MF Gaussiana, a função de pertinência do tipo Sino delimita o universo de discurso  $X$  através de uma curva com transições suaves. Isto pode ser comprovado pela Figura A.3.

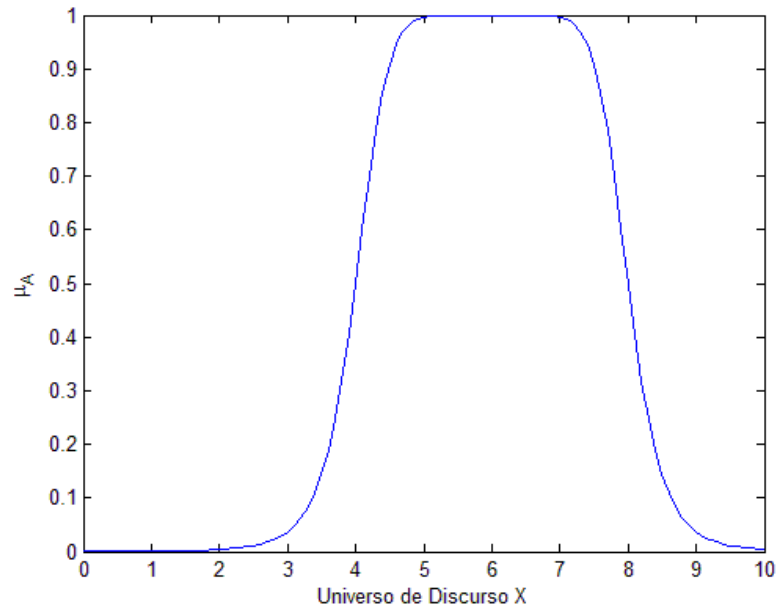


Figura A.4 - Função de pertinência Sino

As MF do tipo Gaussiana e tipo Sino são funções muito difundidas no cenário de sistema de controle, pois permite descrever todo o universo de discurso através de uma transição suave entre os pontos da curva. No entanto, estas funções são incapazes de descrever a variável nítida de forma assimétrica, o que é fundamental em alguns processos de controle.

Diante disso, apresenta-se a seguir um tipo de função que agrega a suavidade e a assimetria necessária para certas aplicações.

- MF Sigmoide;

Finalmente, a função de pertinência do tipo Sigmoide é descrita através de dois parâmetros ( $a$  e  $c$ ) conforme apresenta a equação (A.5).

$$A(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a \cdot (x-c)}} \quad (\text{A.5})$$

Dependendo do sinal utilizado para o parâmetro “ $a$ ”, a MF sigmoide apresentará “abertura” para a direita ou para a esquerda.

Este tipo de função de pertinência é extremamente útil para descrever variáveis linguísticas como “Muito alto” ou “Muito baixo”. Além disso, são frequentemente utilizadas como funções de ativação em Redes Neurais Artificiais.

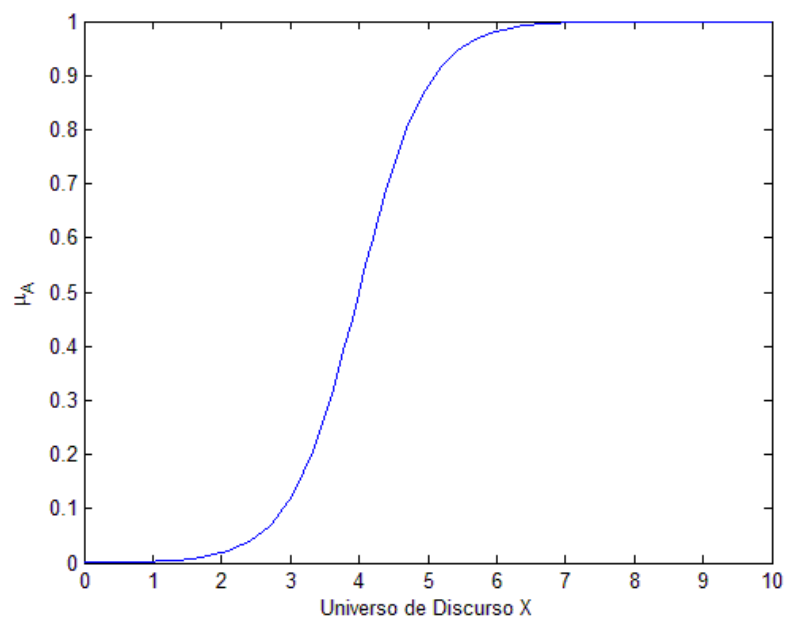


Figura A.5 - Função de pertinência Sigmoide

A Figura A.5 ilustra uma função de pertinência do tipo Sigmoide com abertura para a direita, usualmente utilizada para descrever valores linguísticos associados com valores nítidos elevados dentro do universo de discurso X.

## B. Dados de barra utilizados para o Sistema IEEE 118

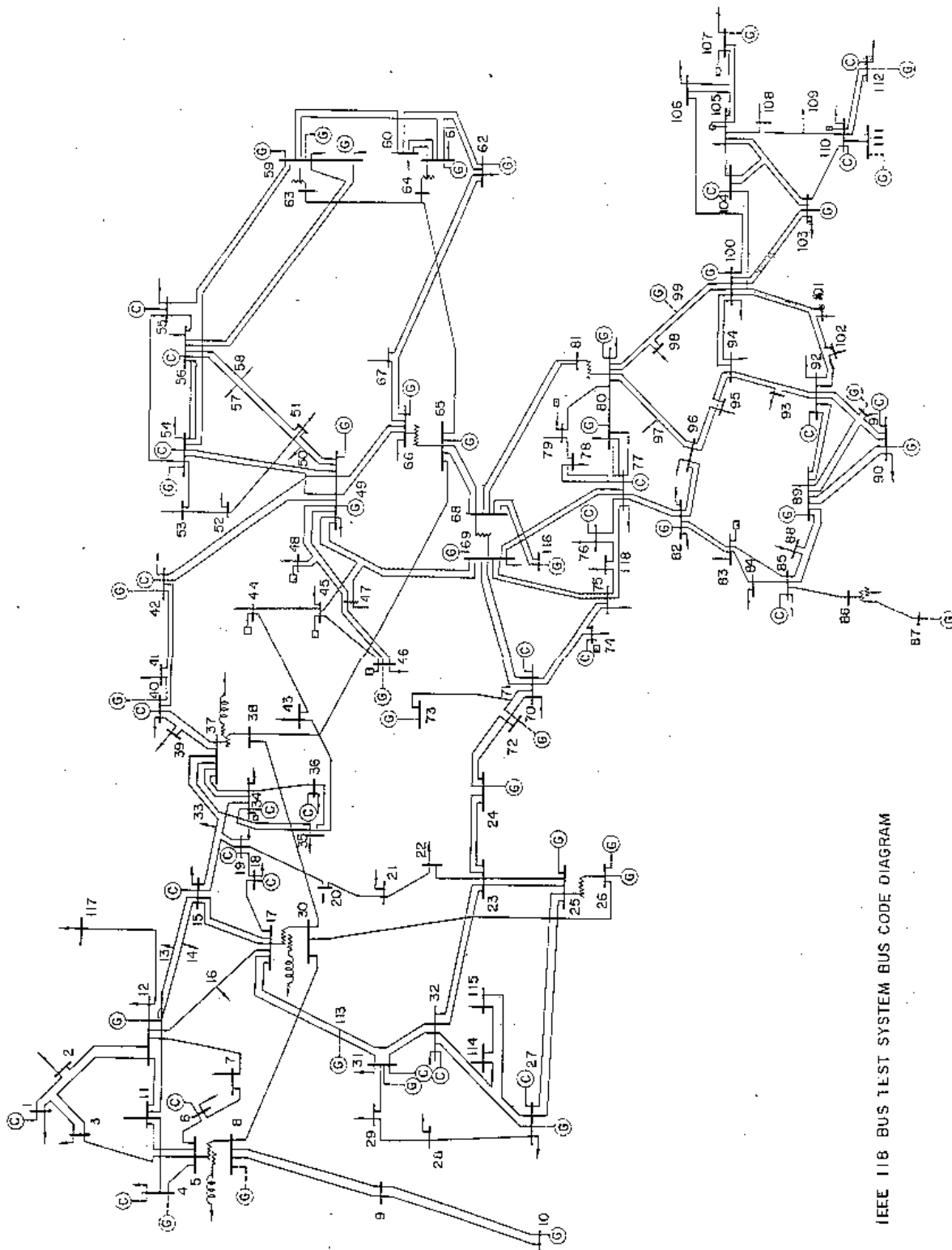
Barra	Tipo	Tensão [p.u.]	Ângulo [graus]	$P_G$ [MW]	$Q_G$ [Mvar]	$Q_{G_{min}}$ [Mvar]	$Q_{G_{max}}$ [Mvar]	$P_L$ [MW]	$Q_L$ [MW]	Shunt [Mvar]
1	PV	0,955	-19,0		-2,5	-5	15	51	27	
2	PQ	1,000	-18,5					20	9	
3	PQ	1,000	-18,1					39	10	
4	PV	0,998	-14,4	-9	-22,4	-300	300	30	12	
5	PQ	1,000	-14,0							-40,1
6	PV	0,990	-16,7		17,8	-13	50	52	22	
7	PQ	1,000	-17,2					19	2	
8	PV	1,015	-8,9	-28	65,8	-300	300			
9	PQ	1,000	-1,7							
10	PV	1,050	5,9	450	-51	-147	200			
11	PQ	1,000	-17,0					70	23	
12	PV	0,990	-17,5	85	92,3	-35	120	47	10	
13	PQ	1,000	-18,4					34	16	
14	PQ	1,000	-18,2					14	1	
15	PV	0,970	-18,5		1,6	-10	30	90	30	
16	PQ	1,000	-17,8					25	10	
17	PQ	1,000	-16,0					11	3	
18	PV	0,973	-18,2		24,2	-16	50	60	34	
19	PV	0,964	-18,7		-5,1	-8	24	45	25	
20	PQ	1,000	-17,8					18	3	
21	PQ	1,000	-16,2					14	8	
22	PQ	1,000	-13,7					10	5	
23	PQ	1,000	-8,8					7	3	
24	PV	0,992	-8,9	-13	-14	-300	300			
25	PV	1,050	-1,8	220	49,6	-47	140			
26	PV	1,015	0,0	314	9,4	-1000	1000			
27	PV	0,968	-14,4	-9	2	-300	300	62	13	
28	PQ	1,000	-16,1					17	7	
29	PQ	1,000	-17,1					24	4	
30	PQ	1,000	-11,0							
31	PV	0,967	-17,0	7	31,5	-300	300	43	27	
32	PV	0,964	-15,0		-12,4	-14	42	59	23	
33	PQ	1,000	-19,1					23	9	
34	PV	0,984	-18,5		-8	-8	24	59	26	13,6
35	PQ	1,000	-18,9					33	9	
36	PV	0,980	-18,9		0,7	-8	24	31	17	
37	PQ	1,000	-18,0							-24,6
38	PQ	1,000	-12,9							
39	PQ	1,000	-21,4					27	11	

Barra	Tipo	Tensão [p.u.]	Ângulo [graus]	$P_G$ [MW]	$Q_G$ [Mvar]	$Q_{Gmin}$ [Mvar]	$Q_{Gmax}$ [Mvar]	$P_L$ [MW]	$Q_L$ [MW]	Shunt [Mvar]
40	PV	0,970	-22,5	-46	27,4	-300	300	20	23	
41	PQ	1,000	-22,9					37	10	
42	PV	0,985	-21,3	-59	41	-300	300	37	23	
43	PQ	1,000	-18,5					18	7	
44	PQ	1,000	-16,1					16	8	9,7
45	PQ	1,000	-14,2					53	22	9,7
46	PV	1,005	-11,4	19	-5,2	-100	100	28	10	10,1
47	PQ	1,000	-9,2					34		
48	PQ	1,000	-10,0					20	11	15,6
49	PV	1,025	-9,0	204	115,7	-85	210	87	30	
50	PQ	1,000	-11,0					17	4	
51	PQ	1,000	-13,6					17	8	
52	PQ	1,000	-14,6					18	5	
53	PQ	1,000	-15,6					23	11	
54	PV	0,955	-14,6	48	3,9	-300	300	113	32	
55	PV	0,952	-14,9		4,7	-8	23	63	22	
56	PV	0,954	-14,8		-2,3	-8	15	84	18	
57	PQ	1,000	-13,5					12	3	
58	PQ	1,000	-14,4					12	3	
59	PV	0,985	-10,5	155	76,8	-60	180	277	113	
60	PQ	1,000	-6,8					78	3	
61	PV	0,995	-5,9	160	-40,4	-100	300			
62	PV	0,998	-6,5		1,3	-20	20	77	14	
63	PQ	1,000	-7,2							
64	PQ	1,000	-5,4							
65	PV	1,005	-2,3	391	79,2	-67	200			
66	PV	1,050	-2,4	392	-2	-67	200	39	18	
67	PQ	1,000	-5,1					28	7	
68	PQ	1,000	-2,4							
69	Swing	1,035	0,0	513	-83,9	-300	300			
70	PV	0,984	-7,4		5,8	-10	32	66	20	
71	PQ	1,000	-7,8							
72	PV	0,980	-8,9	-12	-11,1	-100	100			
73	PV	0,991	-8,0	-6	9,7	-100	100			
74	PV	0,958	-8,3		-6	-6	9	68	27	11,0
75	PQ	1,000	-7,1					47	11	
76	PV	0,950	-8,3		14,2	-8	23	68	36	
77	PV	1,006	-3,2		6,3	-20	70	61	28	
78	PQ	1,000	-3,5					71	26	
79	PQ	1,000	-3,2					39	32	20,4
80	PV	1,040	-1,0	477	104,9	-165	280	130	26	

Barra	Tipo	Tensão [p.u.]	Ângulo [graus]	$P_G$ [MW]	$Q_G$ [Mvar]	$Q_{G_{min}}$ [Mvar]	$Q_{G_{max}}$ [Mvar]	$P_L$ [MW]	$Q_L$ [MW]	Shunt [Mvar]
81	PQ	1,000	-1,8							
82	PQ	1,000	-2,7					54	27	19,6
83	PQ	1,000	-1,5					20	10	9,7
84	PQ	1,000	1,0					11	7	
85	PV	0,985	2,6		-5,8	-8	23	24	15	
86	PQ	1,000	1,2					21	10	
87	PV	1,015	1,4	4	11	-100	1000			
88	PQ	1,000	5,7					48	10	
89	PV	1,005	9,7	607	-13,7	-210	300			
90	PV	0,985	3,3	-85	59,3	-300	300	78	42	
91	PV	0,980	3,4	-10	-15,4	-100	100			
92	PV	0,993	3,8		-1	-3	9	65	10	
93	PQ	1,000	0,8					12	7	
94	PQ	1,000	-1,3					30	16	
95	PQ	1,000	-2,3					42	31	
96	PQ	1,000	-2,4					38	15	
97	PQ	1,000	-2,1					15	9	
98	PQ	1,000	-2,6					34	8	
99	PV	1,010	-2,9	-42	-17,5	-100	100			
100	PV	1,017	-1,9	252	105,8	-50	155	37	18	
101	PQ	1,000	-0,3					22	15	
102	PQ	1,000	2,3					5	3	
103	PV	1,001	-5,5	40	39,8	-15	40	23	16	
104	PV	0,971	-8,2		0,3	-8	23	38	25	
105	PV	0,968	-9,4		-5,5	-8	23	31	26	18,7
106	PQ	1,000	-9,7					43	16	
107	PV	0,960	-12,5	-22	11,3	-200	200	28	12	5,5
108	PQ	1,000	-10,6					2	1	
109	PQ	1,000	-11,0					8	3	
110	PV	0,973	-11,8		3,6	-8	23	39	30	5,7
111	PV	0,980	-10,2	36	-1,8	-100	1000			
112	PV	0,975	-14,9	-43	41,5	-100	1000	25	13	
113	PV	0,993	-16,0	-6	5,8	-100	200			
114	PQ	1,000	-15,3					8	3	
115	PQ	1,000	-15,3					22	7	
116	PV	1,005	-2,8	-184	51,3	-1000	1000			
117	PQ	1,000	-19,1					20	8	
118	PQ	1,000	-8,1					33	15	

# ANEXOS

## A. Sistema acadêmico IEEE118



IEEE 118 BUS TEST SYSTEM BUS CODE DIAGRAM