



COPPE/UFRJ

APLICAÇÃO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY PARA REDUÇÃO DE
MANOBRAS DE DISPOSITIVOS SHUNTS CHAVEADOS AUTOMATICAMENTE
POR UM COMPENSADOR ESTÁTICO

Raphael Lemos Pinto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Glauco Nery Taranto

Rio de Janeiro
Setembro de 2010

APLICAÇÃO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY PARA REDUÇÃO DE
MANOBRAS DE DISPOSITIVOS SHUNTS CHAVEADOS AUTOMATICAMENTE
POR UM COMPENSADOR ESTÁTICO

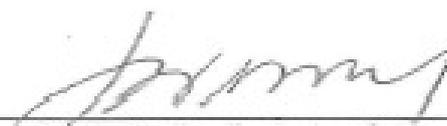
Raphael Lemos Pinto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:


Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.


Prof. Carmen Lucia Tancredo Borges, D.Sc.


Dr. Luiz Cláudio de Araújo Ferreira


Dr. João Alberto Passos Filho

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2010

Pinto, Raphael Lemos

Aplicação de um Sistema Especialista Fuzzy para
Redução de Manobras de Dispositivos Shunts Chaveados
Automaticamente por um Compensador Estático/ Raphael
Lemos Pinto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XVI, 116 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Glauco Nery Taranto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Elétrica, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 112-116.

1. Sistema especialista *fuzzy*. 2. Controle de tensão. 3.
Redução de manobras. I. Taranto, Glauco Nery. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa
de Engenharia Elétrica. III. Título.

A minha esposa Maria Rita,
aos meus pais, Jorge e Angela,
a minha irmã Danielle
e aos meus avós, Benedicto (em memória) e Linda.

Agradecimentos

Àquele que é a verdadeira energia de nossas vidas.

Aos meus colegas de trabalho do Centro de Operação Regional Sudeste (COSR-SE) do ONS, em especial à equipe de Pós-operação pelo apoio e compreensão desde o início desta tarefa.

Ao Professor Glauco Nery Taranto, pela credibilidade ao meu trabalho e orientação.

Ao Dr. João Alberto Passos Filho, pelo valioso auxílio durante a execução do estudo.

Ao mentor, Dr. Luiz Cláudio de Araújo Ferreira, pela orientação, paciência, confiança e amizade, que foram fundamentais desde o início desta etapa na minha vida até a conclusão deste trabalho.

A minha esposa engenheira Maria Rita Valério que com sua paciência e gentileza ímpares, em todos os momentos, amenizou esta caminhada e me encorajou a seguir em frente e não desistir, sempre com muito amor.

Aos meus amigos que compreenderam minha ausência necessária e me entusiasmaram cada um ao seu jeito.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

APLICAÇÃO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY PARA REDUÇÃO DE
MANOBRAS DE DISPOSITIVOS SHUNTS CHAVEADOS AUTOMATICAMENTE
POR UM COMPENSADOR ESTÁTICO

Raphael Lemos Pinto

Setembro / 2010

Orientador: Glauco Nery Taranto

Programa: Engenharia Elétrica

O controle de tensão no sistema elétrico necessita de ritmos diários elevados de manobras em equipamentos de controle de tensão, sujeitando estes a períodos de indisponibilidades maiores, pelo efeito nocivo destas manobras. As indisponibilidades acarretam custo de manutenções corretivas e redução da receita do equipamento, conforme imposto pela regulamentação. Neste contexto, a busca por técnicas de mitigação do número de manobras destes equipamentos é valiosa.

Sendo assim, este trabalho desenvolve um sistema especialista *fuzzy* para o controle do compensador estático de Campos, que permitirá controlar a tensão do barramento em que este se encontra conectado, através de seus recursos de absorção/injeção de reativos e dos equipamentos externos que este chaveia automaticamente.

No estudo é determinado um Caso Base de fluxo de potência para uma curva de carga, utilizando um aplicativo modificado para chavear equipamentos de controle de tensão, por uma estratégia de faixa de operação, que proverá as quantidades de manobras a serem reduzidas. Em seguida é integrado neste programa de fluxo de potência o controlador *fuzzy* e simulada a mesma curva de carga. A comparação dos resultados mostrará que com a aplicação de uma técnica inteligente configurada de maneira próxima ao modo de pensar de operadores humanos, é possível reduzir o número de manobras nos equipamentos *shunt* e, concomitantemente, manter a qualidade da tensão entregue nos barramentos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FUZZY EXPERT SYSTEM APPLICATION FOR REDUCTION OF THE NUMBER
OF MANEUVERS OF SHUNTS DEVICES AUTOMATICALLY CONTROLLED
THROUGH A STATIC CONDENSER

Raphael Lemos Pinto

September / 2010

Advisor: Glauco Nery Taranto

Department: Electrical Engineering

Voltage control in power systems demands a daily rhythmic number of maneuvers in voltage control equipments, subjecting them to long periods of unavailability because of the harmful effect of these great number of maneuvers. The unavailability leads to cost for corrective maintenance and reduces the budget of the equipment (which is defined by sectorial regulation). In this context, the search for techniques to reduce the number of maneuvers of these equipments is valuable.

Thus, this paper develops a *fuzzy* expert system for control of Campos static condenser, which will control the bus voltage where it is connected through its resources of absorption / injection of reactive power and use of external equipments that are controlled automatically.

In the study is determined a load flow base case to a load curve, using a modified network analysis program switching voltage control equipments, through a strategy of voltage level range, which will determine the number of maneuvers to be reduced. After that, is integrated in this network analysis program the *fuzzy* controller and simulated the same load curve. The results comparison will show that the application of an intelligent technique configured near the way of thinking of human operators, permits to reduce the number of maneuvers in the shunt devices, maintaining at the same time the voltage quality delivered in the system buses.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 - Considerações Iniciais	1
1.2 - Objetivos do Estudo	3
1.3 - Estrutura do Trabalho	4
Capítulo 2 O Problema do Chaveamento Excessivo de Equipamentos <i>Shunt</i>	6
2.1 - Introdução	6
2.2 - Efeitos da Alta Taxa de Chaveamentos	7
2.2.1 - Risco de operação durante a energização de banco de capacitores em derivação	8
2.2.2 - Risco de operação durante chaveamento de reator em derivação	10
2.3 - Apuração Mensal de Serviços e Encargos	10
2.3.1 - O custo das indisponibilidades	12
Capítulo 3 Sistema Fuzzy	17
3.1 - Introdução	17
3.2 - Aplicações de Lógica <i>Fuzzy</i>	18
3.3 - Conjuntos <i>Fuzzy</i>	20
3.3.1 - Variáveis linguísticas	21
3.3.2 - Funções de pertinência	22
3.3.3 - Definições e operações	24
3.3.4 - Relações fuzzy	26
3.3.5 - Composição de relações	28
3.3.6 - Proposições fuzzy	29
3.4 - Lógica <i>Fuzzy</i>	32
3.5 - Sistemas de Inferência <i>Fuzzy</i>	36
3.5.1 - Fuzificação	39
3.5.2 - Inferência	40
3.5.3 - Defuzificação	41

Capítulo 4 Compensadores Estáticos de Potência Reativa.....	44
4.1 - Introdução.....	44
4.2 - A Tecnologia FACTS e os Compensadores Estáticos de Potência Reativa... 45	
4.2.1 - Esquemas de Compensadores Estáticos.....	47
4.3 - A utilização de Compensadores Estáticos ao redor do mundo.....	51
4.4 - A utilização atual e futura de Compensadores Estáticos no Sistema Elétrico Brasileiro	57
4.5 - Compensador Estático da SE Campos	61
4.5.1 - Funcionamento da Lógica de Chaveamento dos Elementos Externos.....	63
4.5.2 - Região de Operação do CE de Campos	64
4.5.3 - Chaveamento dos elementos externos	66
4.5.4 - Operação do CE	70
Capítulo 5 Aplicação de um Sistema Especialista Fuzzy em um Compensador Estático	72
5.1 - Introdução.....	72
5.2 - O Sistema Especialista <i>Fuzzy</i> Proposto.....	73
5.3 - Resultados.....	84
5.3.1 - Resultados utilizando chaveamento discreto por faixa de tensão	89
5.3.2 - Resultados utilizando um Sistema Especialista Fuzzy.....	92
Capítulo 6 Conclusões e Considerações Finais	99
Apêndice I Código de Programação do Sistema Especialista Fuzzy no Programa MATLAB	101
I.1 - Código MATLAB (Toolbox <i>Fuzzy</i>)	101
I.2 - Sentenças da Base de Regras	104
Anexo A Modelo do Compensador Estático no ANAREDE.....	106
A.1 - Modelo do CE no ANAREDE.....	106
Referências Bibliográficas.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama H-E dos Conjuntos Fuzzy “pequeno”, “médio” e “grande”	23
Figura 2 – Triangular (trimf), Gaussiana Simples (gaussmf) e Trapezoidal (trapmf)....	24
Figura 3 – Z (zmf), PI (pimf) e S (smf)	24
Figura 4 – Exemplo de Uso das Implicações Min e Produto	35
Figura 5 – Diagrama Típico de um Modelo de Inferência de Mamdani	39
Figura 6 – Métodos de Defuzificação	42
Figura 7 – Reator Controlado a Tiristor – TCR.....	47
Figura 8 – Curvas características de um TCR	48
Figura 9 – Válvula Tiristora de 15 kV de um TCR	48
Figura 10 – Forma de Onda com a Inserção do Capacitor	49
Figura 11 – Foto do TSC - Furnas.....	50
Figura 12 – Foto e Esquema de Montagem do CE de Sylling	51
Figura 13 – Interconexão em 275/330/275 kV, Leste e Sul da Austrália.....	52
Figura 14 – Unifilares dos CE de Braemar e Blackwall.....	53
Figura 15 – Diagrama Esquemático do Sistema de 735 kV do Canadá.....	54
Figura 16 – Unifilar dos CE do Sistema de 735 kV no Canadá	55
Figura 17 – Foto Aérea do CE da Hydro Quebec e Layout da Instalação	56
Figura 18 – Esquema de CE com TCR + FC - SE Barro Alto	59
Figura 19 – CE em Esquema Híbrido – SE Bandeirantes	60
Figura 20 – Diagrama Simplificado da SE Campos com os Grupos de Chaveamento do CE.....	62
Figura 21 – Região de Operação do CE de Campos	65
Figura 22 – Curva de Tempo Inverso para Chaveamento dos Elementos Externos	69
Figura 23 – Variáveis de Entrada para o Sistema de Inferência Fuzzy do CE de Campos	74
Figura 24 – Sistema Fuzzy de Controle do CE de Campos	74
Figura 25 – Variáveis de Saída para o Sistema de Inferência Fuzzy do CE de Campos	76
Figura 26 – Função de Pertinência do Valor da Tensão de 345 kV de Campos	77
Figura 27 – Funções de Pertinência de Estado dos Equipamentos.....	77

Figura 28 – Funções de Pertinência para Disponibilidade dos Capacitores.....	78
Figura 29 – Funções de Pertinência para a Faixa de Reativo do CE.....	78
Figura 30 – Funções de Pertinência - Saídas.....	79
Figura 31 – Função de Pertinência Referência do CE.....	79
Figura 32 – Algoritmo de Solução da Curva de Carga Incorporando um Sistema Especialista Fuzzy	85
Figura 33 – Sistema de Atendimento ao Estado Rio de Janeiro / Espírito Santo, com Destaque para o Tronco de 345 kV	87
Figura 34 – Curva de Carga Aplicada à Simulação.....	88
Figura 35 – Perfil de Tensão do 500 kV da Área RJ/ES	90
Figura 36 – Perfil de Tensão do Tronco de 345 kV da Área RJ/ES.....	90
Figura 37 – Perfil de Tensão das Barras de 138 kV da Área RJ/ES.....	90
Figura 38 – Chaveamento dos Reatores da Área RJ/ES.....	91
Figura 39 – Chaveamento dos Shunts Controlados pelo CE de Campos.....	91
Figura 40 – Atuação nos Elementos Externos do CE de Campos.....	93
Figura 41 – Atuação na Tensão de Referência do CE de Campos	93
Figura 42 – Perfil do Valor das Tensões da SE Campos.....	94
Figura 43 – Curva do Reativo do CE de Campos	94
Figura 44 – Tensão de 345 kV da SE Campos – Caso Base x Caso Fuzzy	95
Figura 45 – Tensão de 138 kV da SE Campos – Caso Base x Caso Fuzzy	95
Figura 46 – Curva do Reativo do CE de Campos – Caso Base x Caso Fuzzy	96
Figura 47 – Chaveamento dos Reatores de 345 kV-60 Mvar RL-5 e RL-6 – Caso Base x Caso Fuzzy	96
Figura 48 – Chaveamento dos Bancos de Capacitores de 345 kV-60 Mvar BC-09 e BC- 10 – Caso Base x Caso Fuzzy	97
Figura 49 – Chaveamento dos Bancos de Capacitores de 138 kV-50 Mvar BC-01 e BC- 02 – Caso Base x Caso Fuzzy	97
Figura 50 – Característica Tensão versus Potência Reativa do CE.....	107
Figura 51 – Característica Tensão versus Corrente do CE.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número Total de Eventos Apurados no Ciclo 2008/2009.....	12
Tabela 2 – Receita e PVI Típicas de Bancos de Capacitores em 345 kV	13
Tabela 3 – Receita e PVI Típicas de Bancos de Reatores em 345 kV	13
Tabela 4 – Receita e PVI Típicas de Bancos de Reatores em 500 kV	13
Tabela 5 – PVI no Ciclo 2008/2009 por Tipo de FT.....	15
Tabela 6 – Compensadores Estáticos Instalados no SIN.....	58
Tabela 7 – Compensadores Estáticos Previstos para o SIN	61
Tabela 8 – Descrição das Variáveis de Entrada do Controlador Fuzzy Proposto.....	75
Tabela 9 – Descrição das Variáveis de Saída do Controlador Fuzzy Proposto.....	76
Tabela 10 – Conjunto de Regras do Controlador Fuzzy para o CE de Campos	81
Tabela 11 – Limites de Tensão Sistêmicos	88
Tabela 12 – Limites de Tensão Específicos	89
Tabela 13 – Número de Manobras por Equipamento de Campos.....	92
Tabela 14 – Comparativo do Número de Manobras entre os Casos Simulados.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Notações:

$\ \cdot\ $	Norma
b_k^{sh}	Susceptância <i>shunt</i> conectada à barra k .
b_k^{inf}	Valor discreto inferior de susceptância <i>shunt</i> conectada à barra k . (do intervalo onde se encontra b_k^{sh})
b_k^{sup}	Valor discreto superior de susceptância <i>shunt</i> conectada à barra k . (do intervalo onde se encontra b_k^{sh})
C_b :	Valor de capacitância do banco de capacitores
i_{peak}	Corrente de pico
i, j, k	Sub-índices
K_o	Fator de Multiplicação - Outros
K_p	Fator de Multiplicação - Programado
L_s :	Valor da indutância equivalente da fonte
nb	Número de barras do sistema.
nc	Número de dispositivos de controle do sistema.
$P_k^{esp} + j \cdot Q_k^{esp}$	Potência complexa líquida especificada para a barra k .
$P_k^{cal} + j \cdot Q_k^{cal}$	Potência complexa líquida calculada para a barra k .
Q_{Gk}^{esp}	Valor especificado de geração de potência reativa na barra k .
Q_{Gk}^{min}	Limite mínimo de geração de potência reativa na barra k .
Q_{Gk}^{max}	Limite máximo de geração de potência reativa na barra k .
ω	Frequência angular

$\mu_A(x)$ Grau de pertinência do elemento x ao conjunto A

Símbolos:

A	Matriz de estado
f	Frequência
$f(\cdot)$	Função
J	Matriz Jacobiana
P	Potência Ativa
Q	Potência reativa
V	Tensão
X	Reatância
Z	Impedância
∂	Operador de derivada
∇	Gradiente
ΔP	Varição incremental de potência ativa
ΔQ	Varição incremental de potência reativa
λ	Varição incremental de um parâmetro ou de um conjunto de parâmetros
\sim	Negação

Abreviaturas:

H-E	Diagrama de Haussi-Euler
LT	Linha de Transmissão
SE	Subestação
TP	Transformador de Potencial
Trafo	Transformador

Siglas:

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANAREDE	Programa Computacional de Análise de Redes (CEPEL)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BC	Banco de Capacitores
CE	Compensador Estático de Potência Reativa
<i>CIGRÉ</i>	<i>International Council on Large Electric Systems</i>
COSR-SE	Centro de Operação Regional Sudeste (ONS)
CPST	Contrato de Prestação de Serviço de Transmissão
CS	Compensador Síncrono de Potência Reativa
<i>EPRI</i>	<i>Electric Power Research Institute</i>
<i>FACTS</i>	<i>Flexible AC Transmission System</i>
FT	Função de Transmissão
<i>HVDC</i>	<i>High Voltage Direct Current</i>
IA	Inteligência Artificial
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>LTC</i>	<i>Load Tap Changer</i>
MG	Módulo geral
MSRE	<i>Mechanical Switched Reactive Elements</i>
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
<i>PSS</i>	<i>Power System Stabilizer</i>
PVI	Parcela Variável por Indisponibilidade
RAP	Receita Anual Permitida
REN	Resolução Normativa

RT	Reator
SIN	Sistema Interligado Nacional
SSC	Sistema de Supervisão e Controle
<i>TCSC</i>	<i>Thyristor Controlled Series Compensator</i>
TSK	Modelo de Inferência <i>Fuzzy</i> Takagi-Sugeno-Kang
UHE	Usina Hidrelétrica

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Iniciais

O Sistema Interligado Nacional (SIN) apresenta uma extensa malha de transmissão que interliga os recursos de geração hidrotérmica aos centros de carga. Esta malha de transmissão constitui-se em uma verdadeira usina virtual, pois permite a utilização dos recursos de geração onde estes apresentam-se em abundância e, conseqüentemente, com o menor custo, em detrimento daqueles de custo mais elevado. Com isso, consegue-se o atendimento à carga minimizando-se os custos de operação.

A característica do SIN é de possuir grandes troncos de transmissão, de forma a proporcionar confiabilidade e flexibilidade à operação, que é planejada e executada de maneira segura, com a transferência de montantes consideráveis de energia entre as regiões geoeletricas, proporcionando a otimização energética.

O atual modelo do setor elétrico é segmentado em geração, transmissão e distribuição, com Agentes desverticalizados, uma agência reguladora – Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e um operador independente, não proprietário dos ativos, responsável pela operação e seu planejamento a curto e médio prazos.

A operação é planejada para suportar contingências simples na rede (critério N-1), podendo ainda ser preparada para suportar contingências múltiplas, em setores estratégicos do sistema, de forma a garantir sua operação segura.

Para tanto, é necessário flexibilidade na operação, o que demanda investimentos em expansão, assim como, a inclusão de novas tecnologias. Desta maneira, ganha vulto a utilização da tecnologia dos dispositivos *FACTS – Flexible AC Transmission Systems*,

uma opção atraente do ponto de vista técnico-econômico para aumentar os limites de transmissão existentes, uma vez que a expansão é cada vez mais dificultada por falta de espaço físico e/ou pela questão ambiental.

Com a reestruturação do setor elétrico no mundo o fator econômico ganhou ainda mais força levando a necessidade de mitigação dos custos, sejam eles de planejamento, de operação ou de manutenção. Concomitantemente, a atual regulamentação brasileira exige, de maneira a garantir a flexibilidade e uma operação segura, requisitos mínimos de desempenho dos equipamentos da rede, como os vinculados à sua disponibilidade para a operação, penalizando as restrições de capacidade e indisponibilidades, para intervenções programadas ou forçadas nestes equipamentos.

O controle de tensão e de carregamento de elementos da rede são fatores importantes para a avaliação das ações ligadas a operação da transmissão, levando a necessidade da determinação adequada de limites para o desempenho seguro do sistema e de seus equipamentos.

Atualmente, o controle de tensão é realizado pelos operadores de sistema elétricos, que dos centros de operação, com a observabilidade fornecida pelos Sistemas de Supervisão e Controle (SSC), coordenam as ações necessárias para a manutenção do perfil de tensão ao longo da rede. Paralelamente, vem-se buscando o automatismo de certos dispositivos de controle.

Em diversas áreas da engenharia, as técnicas inteligentes estão presentes, mais notadamente na área de controle de equipamentos, sistemas ou processos, existindo uma vasta bibliografia contendo tanto aspectos teóricos como exemplos práticos de aplicação (BANSAI, 2003, EL-HAWARY, 1998, GAD, 2004, MALIK, 2000, MEDSKER, 1995, MOMOH, 1995, REZENDE, 2005, RUSSEL, 2004, TOMSOVIC, 2000). Entre as aplicações práticas tem-se destacado as técnicas inteligentes utilizando os conceitos de Redes Neurais, de Algoritmos Genéticos e a Lógica *Fuzzy*.

Em um ambiente onde há necessidade de um controle mais preciso e otimizado, ditados pelos requisitos cada vez mais rígidos de qualidade e confiabilidade, torna-se atraente a busca ferramentas automáticas ou de apoio a tomada de decisão a operação em tempo real.

1.2 - Objetivos do Estudo

O objetivo deste trabalho é o de reduzir o número de manobras em dispositivos *shunt* de grande porte, chaveados por um compensador estático de potência reativa (CE), localizado estrategicamente em um importante tronco de suprimento de uma área do sistema elétrico brasileiro.

Utilizando dados reais de um sistema de grande porte, os resultados da proposta serão aferidos através da comparação técnico e econômica da proposta com o modelo de controle atual, considerando uma curva de carga do sistema, contendo 336 casos de fluxo de potência, com patamares de carga representados em intervalos de 30 em 30 minutos.

O desenvolvimento do trabalho será através dos seguintes objetivos específicos:

- ✓ Propor a aplicação de uma técnica inteligente baseada na experiência de operação;
- ✓ Controlar o valor da tensão em uma localidade, mantendo os requisitos de qualidade demandados pelo normativo vigente, através do chaveamento de equipamentos independentemente da condição de carregamento do sistema;
- ✓ Respeitar rigorosamente os limites dos equipamentos envolvidos;
- ✓ Buscar a representação otimizada dos recursos e das ações de controle;
- ✓ Minimizar o número de manobras de equipamentos de controle de tensão chaveados, de forma a colaborar para a redução do custo por indisponibilidade dos equipamentos envolvidos, sem prejudicar o controle de tensão e o bom desempenho do sistema.

Para o alcance deste objetivo será utilizado um programa de fluxo de potência controlando os valores de tensão em barras de uma área geoeletrica, dentro de faixas de tensão específicas, utilizando os recursos de chaveamento representados discretamente, ao longo da variação da carga através de uma curva de carga semanal.

A técnica inteligente será desenvolvida em ferramenta específica para controlar um compensador estático, e será simulada acopladamente ao programa de fluxo de potência, fazendo o controle do equipamento determinado, não mais pelos controles usuais do programa de fluxo de potência.

Em um primeiro momento será simulada, com auxílio de um programa de fluxo de potência, a necessidade de usos dos recursos de controle de tensão para fazer frente a uma curva de carga semanal do sistema. Para tal, os recursos de controle de tensão serão representados discretamente, conforme prática atual operativa (PASSOS, 2003). Estes resultados serão comparados com os apresentados pelo sistema especialista *fuzzy* proposto, responsável, então nesta etapa, pelo chaveamento dos elementos *shunt* do CE, mantendo-se os demais recursos de controle de tensão chaveados conforme proposição de PASSOS (2003).

Ao final será possível comparar o número de manobras em cada caso, como forma de verificar a eficiência da performance do controlador do compensador estático desenvolvido através da técnica inteligente proposta.

1.3 - Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em seis capítulos, sendo iniciado por este capítulo introdutório.

No Capítulo II é contextualizado, com base na regulamentação vigente, o cálculo do custo dos períodos de indisponibilidade em equipamentos do sistema de transmissão, apuração financeira impactada, entre outros fatores, pelo número de manobras em equipamentos. Neste capítulo é estimada a influência que um grande número de chaveamentos em equipamentos de controle de tensão pode representar na receita permitida para as funções de transmissão importantes para o controle de tensão, como os bancos de capacitores e reatores.

O Capítulo III apresenta os principais conceitos de um sistema especialista baseado em regras de decisão *fuzzy* de forma a melhor representar o raciocínio do operador durante o processo do controle da tensão. Um resumo dos principais conceitos da teoria de conjuntos e da lógica *fuzzy*, juntamente com as aplicações de sistemas *fuzzy* em sistemas de potência também são discutidas neste capítulo.

O Capítulo IV reúne informações sobre equipamentos *FACTS*, especificamente os compensadores estáticos, mostrando sua aplicação pelo mundo e no Brasil, chegando ao equipamento selecionado para o estudo, o CE da SE Campos, apresentando suas características construtivas e operativas, além da área em que este se encontra inserido e sua influência.

No Capítulo V são apresentadas as ferramentas computacionais utilizadas para o estudo de fluxo de potência, junto com os resultados obtidos através da utilização do sistema especialista *fuzzy* proposto no chaveamento dos elementos *shunt* chaveados pelo CE de Campos.

Por fim, o Capítulo VI resume as principais constatações e limitações deste trabalho, sugerindo desenvolvimentos futuros e aperfeiçoamentos do estudo.

CAPÍTULO 2

O PROBLEMA DO CHAVEAMENTO EXCESSIVO DE EQUIPAMENTOS *SHUNT*

2.1 - Introdução

No atual modelo do setor elétrico brasileiro, a qualidade global da energia elétrica é assim garantida a partir da definição de requisitos de qualidade, a serem cumpridos pelos agentes de geração, transmissão e distribuição (PINTO *et al.*, 2009).

Em junho de 2007, foi estabelecida a resolução normativa ANEEL – REN 270/2007, que, em síntese, instituiu para todas as Funções de Transmissão¹ (FT) da Rede Básica² e de Fronteira do SIN regras para verificação da sua qualidade e disponibilidade, através de mecanismos para o cálculo de descontos nas receitas permitidas por indisponibilidade e por restrição operativa na FT.

A partir deste momento foi instituída uma penalização por períodos de indisponibilidades, que abrange todas as empresas de transmissão, e os seus equipamentos.

Como todos os demais equipamentos integrantes do setor elétrico, os controles de reativos ou equipamentos de controle de tensão em derivação (*shunt*), demandam períodos de indisponibilidades tanto por manutenção quanto por desligamentos forçados.

¹ Para fins das apurações são consideradas as definições de Funções de Transmissão da Rede Básica, conforme Resolução Normativa ANEEL n° 191/2005, de 12/12/2005, que são: Linha de Transmissão (LT), Transformação (TR), Controle de Reativo (CR) e Módulo Geral (MG)

² Rede definida e regulamentada pela ANEEL

Ocorre que, pela sua natureza os equipamentos de controle de tensão possuem taxa de manobra diária mais elevada do que os demais equipamentos da rede elétrica, isto para atender às variações da carga ao longo do dia, mantendo a magnitude da tensão nos barramentos dentro dos valores especificados, que são as faixas operativas.

A frequência de manobras nos dispositivos de controle de tensão tem forte relação com os programas de manutenção nestes equipamentos, apontando para a importância da busca de utilização racional destes recursos, de maneira a minimizar o impacto econômico e técnico de suas indisponibilidades para a operação do sistema. No presente capítulo, são expostos estes impactos embasando o estudo do uso racional dos recursos de controle de tensão, sem prejuízo da qualidade da operação do sistema.

Inicialmente, são apresentados os efeitos decorrentes dos chaveamentos em equipamentos de controle de tensão e a sua forte influência na frequência das indisponibilidades destes recursos. Em seguida, é apresentada uma estimativa do impacto econômico, junto com o resumo do processo de Apuração Mensal dos Serviços e Encargos, executado pelo ONS, que precifica as indisponibilidades com base na regulamentação vigente.

2.2 - Efeitos da Alta Taxa de Chaveamentos

Os equipamentos de controle de tensão estão distribuídos na rede elétrica, de forma a compensar perdas e garantir os valores de tensão nos pontos de entrega de energia às unidades consumidoras. Estes equipamentos são numerosos e estrategicamente posicionados, tanto na rede de transmissão como na distribuição.

Tendo como base a rede de operação do SIN, constata-se que alguns equipamentos têm várias manobras diárias. Em localidades submetidas à variação significativa de carga é comum uma maior distribuição de compensação reativa de maneira a diminuir a quantidade de manobras pelos equipamentos.

2.2.1 - Risco de operação durante a energização de banco de capacitores em derivação

Durante a energização de banco de capacitores em derivação é comum o surgimento de uma corrente (*inrush current*) com amplitude e frequência elevadas, dependente dos seguintes parâmetros (BARAN, 2002):

- Impedância equivalente da fonte e do banco de capacitores em derivação;
- Carga residual no banco de capacitores no instante de fechamento do respectivo disjuntor;
- Instante de fechamento do disjuntor (ponto da onda de tensão do sistema);
- Amortecimento devido às perdas na rede.

Na prática, dos parâmetros citados, só existe controle sobre a carga residual dos bancos de capacitores. Segundo a norma brasileira ABNT NBR 5282/1998, as unidades capacitivas que compõem o banco devem ser projetadas para ter no máximo 50 V nos seus terminais depois de decorridos cinco minutos da sua desenergização.

Em adição a este requisito, os bancos de capacitores em derivação normalmente são equipados com circuito de intertravamento que impede o fechamento do disjuntor associado antes de decorridos cinco minutos ou outro tempo especificado pela empresa proprietária, que pode ser facilmente adicionado ao circuito de comando manual ou remoto.

A corrente de *inrush* é máxima quando o banco é energizado no pico da tensão do sistema, estando o banco sem carga residual. A amplitude da corrente de *inrush*, i_{peak} , e a frequência f durante a energização de um banco de capacitores, cujo neutro é isolado, são calculadas da seguinte forma (BARAN, 2002):

$$i_{peak} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V \cdot \sqrt{\frac{C_b}{L_s}} \quad (\text{A}) \quad (2.1)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_b L_s}} \quad (\text{Hz}) \quad (2.2)$$

Onde:

V : valor da tensão eficaz do sistema (fase-fase);

C_b : valor de capacitância do banco;

L_s : valor da indutância equivalente da fonte.

Outro fator a ser levado em conta na energização de um banco de capacitores é a presença de um ou mais bancos de capacitores já energizados na mesma barra, que é chamada de energização em *back to back*.

Nesta condição não é raro encontrar pico de corrente de *inrush* da ordem de 20 kA e frequência de dezenas de kHz, durante energização de banco de capacitores de grande porte. A corrente de energização no banco de capacitores nesta situação é dada pela seguinte expressão:

$$i_{peak} = \left[\frac{2(V/\sqrt{3}) I_1 \cdot I_2}{\omega \cdot L_{equiv} (I_1 + I_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

Onde:

I_1 e I_2 : correntes nominais dos dois bancos de capacitores, sendo um já energizado e outro a ser energizado;

L_{equiv} : indutância equivalente do trecho do barramento localizado entre os dois bancos de capacitores.

De forma a minimizar o transitório durante a energização de um banco de capacitores em derivação, o disjuntor do banco normalmente vem equipado com resistor de pré-inserção (valor típico de 400 W) que é inserido por algum tempo (10 ms) antes do fechamento dos contatos principais do disjuntor.

Mais recentemente, os disjuntores associados a bancos de capacitores são comandados através de sincronizadores, cuja função é fazer, inicialmente, o fechamento dos contatos

na fase com diferença mínima de tensão entre estes contatos. As outras duas fases fecham após um tempo fixo.

Estas duas medidas de proteção reduzem o efeito transitório indesejado no banco de capacitores, contribuindo para o aumento da disponibilidade do equipamento.

2.2.2 - Risco de operação durante chaveamento de reator em derivação

As manobras de energização e de desligamento de reatores *shunts* podem causar solicitações elétricas severas, tanto nestes equipamentos quanto nos disjuntores responsáveis pelos seus chaveamentos.

Durante a energização de um reator, devido à aleatoriedade do instante de fechamento dos contatos do disjuntor, surge uma componente c.c. na corrente. O valor de pico da corrente de energização é máximo quando o fechamento ocorre no cruzamento pelo zero da tensão do sistema.

No caso da abertura do reator em carga, o corte da corrente do reator antes do seu cruzamento pelo zero poderá gerar sobretensão de manobra sobre o equipamento, cuja amplitude é função das características do disjuntor e do reator em derivação.

Este chaveamento poderá gerar a reignição do arco na câmara do disjuntor, que poderá ser mais nociva quando maior for a tensão aplicada entre os pólos do disjuntor, até o limite de suportabilidade do equipamento para este parâmetro.

Como medida mitigadora, é comum o emprego de sincronizadores para a abertura do disjuntor associado ao reator em derivação, com o objetivo de reduzir a sobretensão no instante do chaveamento e aumentar a disponibilidade do equipamento.

2.3 - Apuração Mensal de Serviços e Encargos

As transmissoras disponibilizam para a operação do SIN as instalações integrantes da Rede Básica, via Contrato de Prestação de Serviço de Transmissão (CPST), e para tanto, recebem uma Receita Anual Permitida (RAP). Assim, uma forma efetiva de se

obter resultados positivos de seus desempenhos via regulação, é a que vincula a qualidade do serviço à receita permitida. Desta maneira, a qualidade do serviço da transmissão prestado pelas transmissoras, será aferida de forma a atender aos requisitos estabelecidos nos CPST e tendo por princípio a aplicação de uma Parcela Variável devido à indisponibilidade (PVI) da FT., a ser descontada da sua RAP (PINTO *et al.*, 2009).

Os eventos que geram as indisponibilidades ou restrições são os desligamentos programados e forçados, além das restrições operativas, seja de potência ou manobra, que são informadas pelos agentes ao longo do dia. Destaca-se que as indisponibilidades são contabilizadas a partir de um minuto de duração.

As necessidades sistêmicas oriundas da coordenação do operador nacional, como desligamentos para controle de tensão ou controle de carregamento, em elementos como linhas de transmissão ou equipamentos de controle de reativos, não imputam PVI, já que estes são imprescindíveis para as ações de controle do SIN.

Cada tipo de restrição ou indisponibilidade das FT da Rede Básica é classificado, como também são determinados os horários de seus inícios e terminos, de forma a gerar penalidade ou não para o proprietário. Após isto, os dados são contabilizados através da conversão dos períodos de indisponibilidade do equipamento em valores de desconto das receitas permitidas aos agentes. Considerando este tipo de apuração, independente da função de transmissão, as empresas proprietárias despendem esforços para a redução de indisponibilidades de seus equipamentos, de forma a mitigar os descontos em sua receita.

As formas possíveis de evitar indisponibilidades passam pelo planejamento dos ciclos de manutenções preventivas e corretivas, uso de equipamentos que auxiliam na redução do desgaste dos equipamentos e a operação ao longo do dia mais otimizada possível, dentro dos limites de capacidade operativa, e mais especificamente para equipamentos de manobra, buscando-se, sempre que possível, a redução do número de chaveamentos dos equipamentos, entre outros.

2.3.1 - O custo das indisponibilidades

Os equipamentos podem ficar indisponíveis por desligamentos forçados, como os automáticos provocados por atuação de suas proteções, ou eventos programados, como as manutenções, podendo estes últimos eventos serem planejados e programados com antecedência, evitando a fadiga em equipamentos e o risco de desligamentos forçados, por serem estes de maior custo.

A partir da Tabela 1 são mostradas, como ilustração, dentro de um período compreendendo eventos ocorridos entre 03/06/08 a 31/05/09, típicas apurações de indisponibilidades de funções de transmissão na Rede Básica (equipamentos ligados à rede com tensão igual ou superior a 230 kV), passíveis de cobrança de Parcela Variável. No período em questão, foram totalizados 3.765 eventos desconsiderando eventos de FT em carência.

Tabela 1 – Número Total de Eventos Apurados no Ciclo 2008/2009

Apuração	Total do Ciclo 2008/2009
Eventos com Desconto	1124
Eventos sem Desconto (padrão não ultrapassado)	2641
Evento em Carência	168
Total de Eventos	3933

O cálculo da PVI é dado por:

$$PVI = \frac{PB}{1440 \times D} \times K_p \times \left(\sum_{i=1}^{NP} DVDP_i \right) + \frac{PB}{1440 \times D} \times \left(\sum_{i=1}^{NO} K_{o_i} \times DVOD_i \right) \quad (2.4)$$

Onde:

PB = Pagamento Base da FT;

D = número de dias do mês;

DVDP = somatório da duração, em minutos, de cada Desligamento Programado que ocorra durante o mês relativo a uma FT;

DVOD = somatório da duração, em minutos, de cada um dos Outros Desligamentos que ocorram durante o mês relativo a uma FT;

K_p = fator para Desligamentos Programados definido de acordo com a regulamentação vigente;

K_o = fator para Outros Desligamentos com duração de até 300 minutos. Este fator será reduzido para K_p após o 300º minuto e é definido conforme regulamentação vigente;

NP = Número de Desligamentos Programados da FT ao longo do mês;

NO = Número de Outros Desligamentos da FT ao longo do mês.

Para expor o custo das indisponibilidades consideradas na PVI, são apresentadas a seguir as Tabela 2 a 4, que mostram os valores desta parcela a serem descontados para o equipamento em um determinado período, de acordo com a equação 2.4, para um minuto de cada tipo de desligamento. Vale lembrar que a receita mensal de cada equipamento é estabelecida no CPST do Agente.

Tabela 2 – Receita e PVI Típicas de Bancos de Capacitores em 345 kV

Tipo de Desligamento	Duração (min)	Receita Mensal (R\$)	PVI (R\$)
Programado	1	106.128,81	24,57
Urgência	1		122,83
Automático	1		368,50

Tabela 3 – Receita e PVI Típicas de Bancos de Reatores em 345 kV

Tipo de Desligamento	Duração (min)	Receita Mensal (R\$)	PVI (R\$)
Programado	1	52.511,12	12,16
Urgência	1		60,78
Automático	1		182,33

Tabela 4 – Receita e PVI Típicas de Bancos de Reatores em 500 kV

Tipo de Desligamento	Duração (min)	Receita Mensal (R\$)	PVI (R\$)
Programado	1	261.576,49	60,55
Urgência	1		302,75
Automático	1		908,25

Pelas tabelas apresentadas anteriormente verifica-se que o tipo do desligamento afeta em muito o valor da PVI, isto devido ao fator de multiplicação (K) que incide para cada caso: desligamentos programados ($K_p=10$), de urgência ($K_o=50$) ou automático ($K_o=150$).

Os diversos equipamentos das empresas de transmissão possuem receitas próprias, que variam de acordo com a sua importância para o sistema e o investimento necessário. Este valor, atualmente, é determinado no leilão de concessão do empreendimento realizado pela ANEEL.

Para os equipamentos que não foram licitados, pertencentes às antigas empresas de transmissão, verificam-se valores de receita menores que as de remuneração dos novos equipamentos, uma vez que a legislação determinou que os investimentos para aqueles primeiros equipamentos já foram amortizados ao longo do tempo. Como exemplo, os equipamentos apresentados nas Tabela 2 e 3 são equipamentos antigos e a receita para remuneração do reator ilustrado na Tabela 3 é menor do que a estipulada para o equipamento exemplificado na Tabela 4, não só pelo porte e classe de tensão inferior, mas também pela idade do equipamento.

Ressalta-se que para as FT integrantes de concessão não decorrente de licitação e autorizadas até 26/06/2007, existem regras de diminuição à incidência de PVI, como um Padrão de Duração de Desligamento (em horas). Assim, somente após a soma das durações dos desligamentos de uma FT, apuradas no período contínuo de doze meses anteriores ao da ocorrência, incluindo este, ultrapassar o correspondente padrão, caberá a aplicação de desconto de PVI.

A Tabela 5 abaixo apresenta a PVI contabilizada no ciclo 2008/2009 por tipo de FT, sendo que para a FT-Controle de Reativos os resultados estão detalhados por tipo de equipamento principal.

Tabela 5 – PVI no Ciclo 2008/2009 por Tipo de FT

PARCELA VARIÁVEL CONTABILIZADA (Ciclo 2008/2009)					
Tipo Concessão	Tipo Função Transmissão		Total do Ciclo 2008/2009 (R\$)	%	
Não Licitadas	LT (Linha de Transmissão)		11.544.021,80	24,13	
	TR (Transformador)		8.849.316,12	18,50	
	CR (Controle de Reativos)	BC (Banco de Capacitores)	743.054,66	1,55	22,95
		CRE (Compensador Reativo Estático)	1.635.310,28	3,42	
		CSE (Comp. Série)	4.399.564,66	9,20	
		CSI (Comp. Síncrono)	1.984.329,42	4,15	
		REA (Reator)	2.217.310,87	4,63	
		Total	10.979.569,89	-	
	MG (Módulo Geral)		239.726,07	0,50	
	TOTAL		31.612.633,88	66,07	
Licitadas	LT		7.120.105,35	14,88	
	TR		578.633,08	1,21	
	CR	BC	0	0	17,83
		CRE	696.518,84	1,46	
		CSE	7.502.842,20	15,68	
		CSI	0	0	
		REA	333.074,42	0,70	
		Total	8.532.435,46	-	
	MG		816,54	0	
	TOTAL		16.231.990,43	33,93	
Total	LT		18.664.127,15	39,01	
	TR		9.427.949,20	19,71	
	CR	BC	743.054,66	1,55	40,78
		CRE	2.331.829,12	4,87	
		CSE	11.902.406,86	24,88	
		CSI	1.984.329,42	4,15	
		REA	2.550.385,29	5,33	
		Total	19.512.005,35	-	
	MG		240.542,61	0,50	
	TOTAL		47.844.624,31	100,0	
Total de Desconto por Atraso de Entrada em Operação			580.128,02		
TOTAL GERAL			48.424.752,33		

Com base na análise da Tabela 5, verifica-se que os equipamentos de controle de potência reativa, são responsáveis por uma grande parcela nos descontos à receita permitida das transmissoras, superando até mesmo as linhas de transmissão, com maior probabilidade de risco de desligamento forçados, por serem equipamentos longos e com grande exposição às intempéries da natureza. Este fato pode ser explicado pela maior incidência de manobras nos equipamentos de controle de tensão, provocando uma necessidade maior de manutenção ou ocorrências desligamentos forçados nestes tipos de equipamentos, a despeito dos esforços de engenharia para mitigar o efeito dos surtos de manobra nos equipamentos de controle de tensão, Esta constatação, junto com necessidade da manutenção da qualidade de operação do sistema interligado, embasa econômica e tecnicamente a importância do tratamento do problema, conforme proposta deste estudo.

CAPÍTULO 3

SISTEMA FUZZY

3.1 - Introdução

O mundo é um lugar complexo devido às incertezas e ambiguidade. O homem tem a capacidade de resolver problemas bastante complexos, baseados em informações imprecisas ou aproximadas, devido à habilidade de pensar e se adaptar ao ambiente, que está em constante mutação.

A estratégia adotada pelos operadores humanos em diversas atividades é também de natureza imprecisa e geralmente possível de ser expressa em variáveis linguísticas.

A teoria de conjuntos *fuzzy*³ e os conceitos de Lógica *fuzzy* foram concebidos por Lotfi A. Zadeh (ZADEH, 1965) com o objetivo de fornecer, através de um ferramental matemático, um meio para a representação de incertezas e tratamento de informações de caráter impreciso ou vago (ZADEH, 1973), atendendo a deficiência dos sistemas especialistas convencionais.

Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação como um conjunto de regras da forma *se...então*, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser construído. O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, no qual a Teoria de Conjuntos *Fuzzy* e Lógica *Fuzzy* fornecem o ferramental matemático para se lidar com as tais regras linguísticas.

³ *fuzzy*: vago, indistinto, incerto, nebuloso, difuso.

Existindo várias referências sobre o assunto (KLIR, 1988, COX, 1994, MENDEL, 1995, ROSS, 1995, LIN, 1996, ZIMMERMANN, 1996, REZENDE, 2005, TANSCHKEIT, 2008) este capítulo busca resumir os principais conceitos da teoria, de maneira a embasar a utilização da lógica *fuzzy* no sistema especialista proposto.

3.2 - Aplicações de Lógica *Fuzzy*

A tecnologia da lógica *fuzzy* alcançou sucesso em diversas aplicações, desde produtos de consumo em massa do mercado, como eletrodomésticos, a problemas sofisticados de decisão e controle.

A seguir são ilustradas algumas aplicações dos conceitos da lógica *fuzzy* no controle de sistemas mecânicos (COSTA *et al.*, 2005):

- Aspiradores de pó *Matsushita* usam controladores de quatro *bits* rodando algoritmos sensores de pó e ajustam o poder de sucção;
- Máquinas de lavar *Hitachi* usam controladores *fuzzy* para controle de peso, verificação de tipo de tecido e sensores de sujeira, que automaticamente designam os ciclos de lavagem para uso otimizado de potência, água, e detergente;
- Um ar condicionado industrial projetado pela *Mitsubishi* usa vinte e cinco regras de resfriamento e de aquecimento. Um sensor de temperatura fornece a entrada, com controle de saída alimentado por um inversor, uma válvula compressora e um ventilador. Comparado com o projeto anterior, o ar condicionado com controlador *fuzzy* aquece cinco vezes mais rápido, reduz o consumo de potência em 24% e usa menos sensores;
- Uma máquina de lavar pratos “inteligente” baseado em um controlador *fuzzy* e um *one stop sensing module* que combina um tiristor (para medida de temperatura), um sensor condutivo (para medir o nível de detergente através dos íons presentes na água), um sensor de turvação, que difunde a medida e transmite luz para medir a sujeira na lavagem, e um sensor magnético para ler a taxa de giro. O sistema determina uma otimização no ciclo de lavagem para

qualquer carga obter os melhores resultados com o mínimo de energia, detergente e água;

- Utilização de lógica *fuzzy* em serviços prestados a bibliotecas, gerando indicadores de desempenho dos serviços realizados por essa. São definidas variáveis como “tempo de resposta”, “acesso”, “cortesia” e “confiança”;
- Usa-se lógica *fuzzy* na determinação de parâmetros de controle de altitude e condução de aeronaves não tripuladas, onde existe uma série de regras baseadas em variáveis e valores linguísticos.

Podem ser exemplificadas também aplicações em áreas diversas (TANSCHKEIT, 2008):

- Controle de aeronave (*Rockwell Corp.*);
- Operação do metrô de Sendai (*Hitachi*);
- Transmissão automática (*Nissan, Subaru*);
- *Space Shuttle Docking* (*NASA*);
- Elevadores (*Hitachi, Fujitech, Mitsubishi*);
- Análise do mercado de ações (*Yamaichi*);
- Ajuste da imagem de TV (*Sony*);
- Autofocus para câmera de vídeo (*Canon*);
- Estabilizador de imagens de vídeo (*Panasonic*);
- Lógica *fuzzy* e variáveis linguísticas aplicadas na avaliação de desempenho de edifícios de escritório (REINGHANTZ, 2002);
- Controlador nebuloso (*fuzzy*) no controle de qualidade da fabricação das garrafas PET (SILVA *et al.*, 2003).

As aplicações nas áreas do sistema elétrico são extensas. Muitas dessas aplicações foram implementadas no campo por suas características práticas. De maneira geral podem ser citadas algumas destas aplicações (TOMSOVIC, 2000):

- Em segurança de tensão: prevenção e identificação de colapso de tensão, monitoração da margem de segurança de tensão em áreas de sistemas elétricos, e estabilidade de tensão;
- Propostas para minimização de perdas e planejamento em sistemas de distribuição;
- No campo da geração de energia: programa de manutenção de geradores, controle carga-frequência e despacho de geração;
- Análise de contingências;
- Previsão de carga;
- Sinais de controle estabilizadores (*PSS*);
- Controle de tensão: controle coordenado secundário, controle de tensão na distribuição, controle de comutadores de *TAP* de transformadores e controle de tensão de subáreas de um sistema.

3.3 - Conjuntos *Fuzzy*

A Teoria de Conjuntos *Fuzzy* foi concebida por L.A. Zadeh com o objetivo de fornecer um ferramental matemático para o tratamento de informações de caráter impreciso ou vago.

Os termos *fuzzy* definem categorias gerais, mas não rígidas ou fixas de coleções. A transição de uma categoria - conceito, idéia, ou problema - para o próximo estado é gradual, com alguns estados tendo pertinência maior ou menor no conjunto do que no outro. Desta idéia de conjuntos elásticos, Zadeh propôs o conceito de um conjunto *fuzzy*.

A lógica *fuzzy* começa com o conceito de um conjunto *fuzzy*. Um conjunto *fuzzy* é um conjunto sem um limite *crisp* ou claramente definido. Pode conter elementos com função de pertinência apenas parcial.

A lógica *fuzzy*, baseada nessa teoria, foi inicialmente construída a partir dos conceitos já estabelecidos de lógica clássica; operadores foram definidos à semelhança dos tradicionalmente utilizados e outros foram introduzidos ao longo do tempo, muitas vezes por necessidades de caráter eminentemente prático.

3.3.1 - Variáveis linguísticas

Variável é um identificador que pode assumir um dentre vários valores. Neste caso estas variáveis têm seu valor expresso qualitativamente por um termo linguístico, ou seja, que fornece conceito a uma variável, e quantitativamente por uma função de pertinência.

Por exemplo, a temperatura de um determinado processo pode ser uma variável linguística assumindo valores: *baixa, média, e alta*.

De fato, uma variável linguística pode ser caracterizada por $n, T, X, m(n)$ onde n é o nome da variável (temperatura, pressão, febre, etc.), T é o conjunto de termos linguísticos de n (elevado, baixo, pouco, extenso, etc.), X é o domínio (Universo) de valores de n sobre o qual o significado do termo linguístico é determinado (a febre pode estar, por exemplo, entre 35 e 40° C) e $m(t)$ é uma função semântica que assinala para cada termo linguístico $t \rightarrow T$ o seu significado, que é um conjunto *fuzzy* em X (ou seja, $m : T \rightarrow X$ onde X é o espaço dos conjuntos *fuzzy*).

Basicamente existem três tipos de variáveis linguísticas:

1. Regras de atribuição:

- “A é não alto e não muito baixo”;
- “Velocidade do carro = rápida”;
- “Cor da maçã = vermelha”;
- “Tamanho do copo = grande”.

2. Regras condicionais:

- “Se o tamanho do copo é grande, então armazena mais água”;
- “Se X é grande, então temperatura é alta”.

3. Regras incondicionais:

- “Vá para X ”;
- “Pare”;
- “Ligue o aquecedor”.

A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos.

Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais.

3.3.2 - Funções de pertinência

Um conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência (*Membership Function*) que assume valores dentro do intervalo $[0,1]$. Enquanto na teoria de conjuntos clássica, a função de pertinência assume apenas os valores zero, indicando que o elemento não pertence (\notin) ao conjunto, ou um indicando que o elemento pertence (\in) ao conjunto, já na teoria de conjuntos *fuzzy*, os elementos podem estar associados a graus de pertinência entre zero e um indicando que os mesmos podem pertencer parcialmente a um conjunto (AMENDOLA, 2005).

O grau de pertinência é conhecido como a pertinência ou veracidade da função, pois estabelece uma correspondência entre cada elemento do domínio e um valor real, indicando o grau de pertinência deste no conjunto (IEEE, 2000).

A representação de conjuntos *fuzzy* depende basicamente da natureza e da dimensão do universo de discurso definido (REZENDE, 2005). A forma mais fácil de representação é o gráfico de sua função de pertinência, chamado de diagrama de Hassi-Euler (H-E), conforme Figura 1. Nesta figura estão representados três conjuntos *fuzzy* denominados “pequeno” (P), “médio” (M) e “grande” (G) em um universo de discurso real $U : [0,5]$.

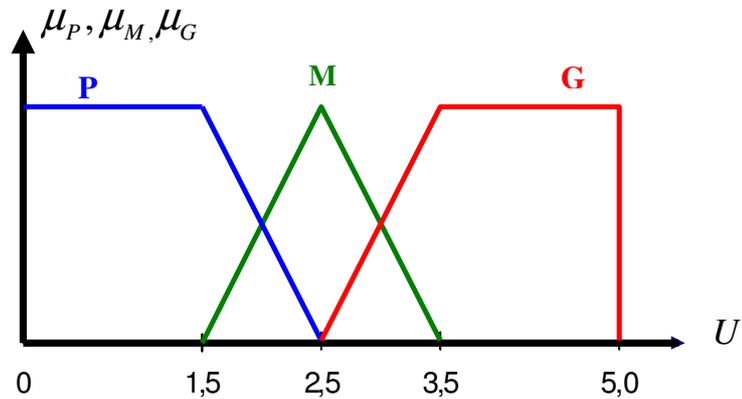


Figura 1 – Diagrama H-E dos Conjuntos Fuzzy “pequeno”, “médio” e “grande”⁴

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas.

A mais usada e prática das funções de pertinência é a triangular, porém também são usadas outras formas, como a trapezoidal, que contém mais informação que a triangular. Pode ser utilizada uma equação quadrática (envolvendo áreas ou números de segunda ordem) para produzir uma curva contínua (gaussiana).

Outras formas de funções representativas são nomeadas pela sua aparência como, a função S, a função PI, e a função Z.

As Figura 2 e 3 abaixo mostram algumas formas de funções e seus códigos no MATLAB.

⁴ Fonte: FERREIRA, L. C. A., 2008, Análise a longo-termo da estabilidade de tensão utilizando métodos estáticos e um sistema especialista fuzzy para representação de ações de controle. Tese D.Sc., Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, Brasil, p. 240.

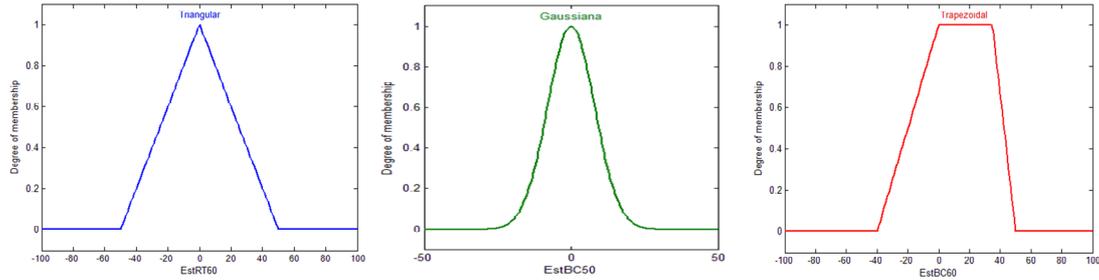


Figura 2 – Triangular (*trimf*), Gaussiana Simples (*gaussmf*) e Trapezoidal (*trapmf*)

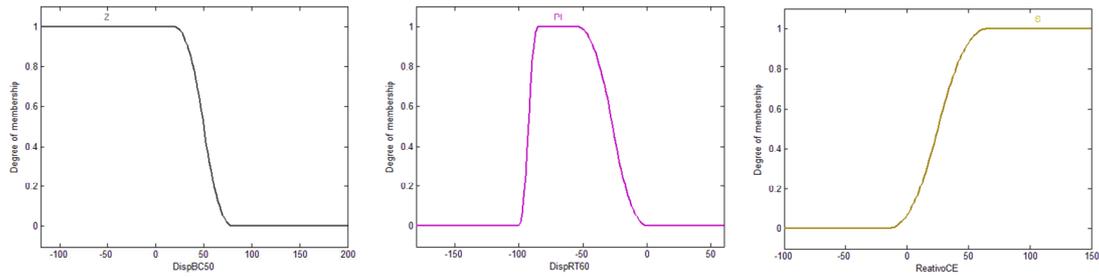


Figura 3 – Z (*zmf*), PI (*pimf*) e S (*smf*)

De forma geral, qualquer função que associe valores entre **zero** e **um** a elementos de um dado conjunto, pode ser tomada como função de pertinência. Entretanto, na escolha de tais funções, deve-se levar em conta o contexto em que estas serão utilizadas na representação das variáveis linguísticas. Neste sentido, tanto o número quanto o formato das funções de pertinência devem ser escolhidos de acordo com o conhecimento sobre o processo que se pretende estudar.

3.3.3 - Definições e operações

Considerando os conjuntos *fuzzy* A e B em um universo U , sejam:

$$\text{Conjunto vazio:} \quad A = \emptyset \text{ se e somente se } \forall u \in U, \mu_A(u) = 0 \quad (3.1)$$

$$\text{Complemento } A': \quad \mu_{A'}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (3.2)$$

$$\text{Conjuntos iguais:} \quad A = B \text{ se e somente se } \forall u \in U, \mu_A(u) = \mu_B(u) \quad (3.3)$$

$$\text{A subconjunto de } B: \quad A \subset B \text{ se } \forall u \in U, \mu_A(u) < \mu_B(u) \quad (3.4)$$

Fazendo-se uso dos operadores *minimum* (*min* ou \wedge) e *maximum* (*max* ou \vee), as funções características resultantes da interseção e união dos conjuntos podem ser representadas da seguinte forma:

$$f_{A \cap B}(x) = f_A(x) \wedge f_B(x) \quad \forall x \in X \quad (3.5)$$

$$f_{A \cup B}(x) = f_A(x) \vee f_B(x) \quad \forall x \in X \quad (3.6)$$

Embora a união e a interseção possam ser descritas também por meio de outros operadores, Zadeh (ZADEH, 1965) estendeu as formas de união e interseção *fuzzy*, de modo que:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (3.7)$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (3.8)$$

Zadeh também sugeriu a soma algébrica para a união *fuzzy*:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x) \quad (3.9)$$

e o produto algébrico para a interseção *fuzzy*:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x)\mu_B(x) \quad (3.10)$$

Posteriormente, com o objetivo de generalização, foram definidos operadores de base axiomática, baseados nos conceitos de norma triangular (*norma-t*) e co-norma triangular (*co-norma-t* ou *norma-s*) (KANDEL, 1986, GUPTA, 1990).

Uma *norma-t* é uma operação binária $*: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ tal que, $\forall x, y, z, w \in [0,1]$, as seguintes propriedades são satisfeitas:

- Comutatividade: $x * y = y * x$, (3.11)

- Associatividade: $(x * y) * z = x * (y * z)$, (3.12)

- Monotonicidade: se $x \leq y$, $w \leq z$, então $x * w \leq y * z$; (3.13)

- Condições de contorno: $x * 0 = 0$ e $x * 1 = x$. (3.14)

Uma *co-norma-t*, ou *norma-s*, é uma operação binária $\oplus: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$, que satisfaz as seguintes propriedades:

- Comutatividade: $x \oplus y = y \oplus x$ (3.15)

- Associatividade: $(x \oplus y) \oplus z = x \oplus (y \oplus z)$ (3.16)

- Monotonicidade: se $x \leq y$, $w \leq z$, então $x \oplus w \leq y \oplus z$ (3.17)

- Condições de contorno: $x \oplus 0 = x$ e $x \oplus 1 = 1$ (3.18)

A bibliografia registra inúmeras *normas-t* e *co-normas-t*, mas em aplicações, principalmente em engenharia, têm sido utilizados preponderantemente os operadores *min* e produto algébrico para interseção, e o operador *max* para a união (TANSCHKEIT, 2008).

3.3.4 - Relações fuzzy

Conjuntos *fuzzy* e operadores *fuzzy* são os sujeitos e os verbos da linguagem da lógica *fuzzy*. E as regras *se...então* são usadas para formular as regras condicionais que compreendem a lógica *fuzzy*.

Os termos linguísticos usados são representados por suas variáveis linguísticas e a semântica dada pelas suas funções de pertinência, conforme apresentado anteriormente. Esta cadeia forma um dos mais importantes benefícios da lógica *fuzzy*, que é a facilidade de codificar e automatizar o conhecimento humano expresso por proposições naturais da língua.

Basicamente, existem quatro métodos para a obtenção de regras *fuzzy* (TOMSOVIC, 2000):

1. Através do conhecimento e experiência de um especialista;
2. Através da observação do comportamento humano;
3. Através da modelagem *fuzzy* de um processo;
4. Através de aprendizagem de máquina.

No coração da base de regras *fuzzy* estão as regras *se...então*. Esta regra é normalmente formada por duas partes:

se < antecedente > então < conseqüente >

O *antecedente* é composto por um conjunto de condições que quando mesmo parcialmente satisfeitas, determinam o processamento do *consequente* da regra por um mecanismo de inferência *fuzzy*. Este processo descrito denomina-se “disparo” de uma regra.

Por sua vez, o *consequente* é composto de um conjunto de ações ou diagnósticos que serão gerados com o disparo da regra. Os *consequentes* das regras disparadas são processados em conjunto para gerar uma resposta determinística para cada variável de saída do sistema. O *antecedente* e o *consequente* são variáveis linguísticas.

No caso de conjuntos ordinários, uma relação exprime a presença ou a ausência de uma associação entre elementos de dois ou mais conjuntos.

Formalmente, dados dois universos X e Y , a relação R definida em $X \times Y$ é um subconjunto do produto cartesiano dos dois universos, de tal forma que $R: X \times Y \rightarrow \{0,1\}$. Ou seja, se algum $x \in X$ e $y \in Y$ estiverem relacionados, $R(x, y) = 1$; caso contrário, $R(x, y) = 0$. Isto pode ser expresso pela seguinte função característica (ou função de pertinência bivalente):

$$f_R(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } (x, y) \in R \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (3.19)$$

Relações *fuzzy* generalizam o conceito de relações e representam o grau da associação entre elementos de dois ou mais conjuntos *fuzzy*. Formalmente, dados dois universos X e Y , a relação *fuzzy* R é um conjunto *fuzzy* em $X \times Y$, caracterizada por uma função de pertinência $\mu_R(x, y) \in [0, 1]$, onde $x \in X$ e $y \in Y$.

A interseção e a união de relações *fuzzy* são definidas de forma similar às mesmas operações com conjuntos *fuzzy*. Considerando-se duas relações *fuzzy* R e S definidas em um mesmo espaço $X \times Y$, as funções de pertinência resultantes são:

$$\mu_{R \cap S}(x, y) = \mu_R(x, y) * \mu_S(x, y) \quad (3.20)$$

$$\mu_{R \cup S}(x, y) = \mu_R(x, y) \oplus \mu_S(x, y) \quad (3.21)$$

3.3.5 - Composição de relações

A consideração inicial de duas relações *não-fuzzy* $P(X, Y)$ e $Q(Y, Z)$, que têm um conjunto (Y) em comum, pode ser útil para analisar a importância da composição de relações *fuzzy* nos sistemas de inferência. A composição dessas duas relações é definida como um subconjunto $R(X, Z)$ de $X \times Z$ tal que $(x, z) \in R$ se e somente se existe pelo menos um $y \in Y$ tal que $(x, y) \in P$ e $(y, z) \in Q$, e é denotada por:

$$R(X, Z) = P(X, Y) \circ Q(Y, Z) \quad (3.23)$$

A operação realizada para se obter $R(X, Z)$ pode ser representada por qualquer uma (embora não somente) das seguintes expressões:

$$\text{Composição } \textit{max-min}: f_R(x, z) = f_{P \circ Q}(x, z) = \{(x, z), \max_y[\min(f_p(x, y), f_q(y, z))]\}$$

$$\text{Composição } \textit{max-produto}: f_R(x, z) = f_{P \circ Q}(x, z) = \{(x, z), \max_y[(f_p(x, y) f_q(y, z))]\}$$

Um maneira prática de realizar as operações acima consiste em se efetuar a "multiplicação" das matrizes relacionais, tomando o cuidado de substituir cada multiplicação pela operação *min* e cada adição pelo operador *max*.

A composição de relações *fuzzy* é definida de maneira análoga. A expressão para a função de pertinência resultante da composição de duas relações *fuzzy* com um conjunto *fuzzy* em comum é generalizada para:

$$\mu_R(x, z) = \mu_{P \circ Q}(x, z) = \sup_y [\mu_P(x, y) * \mu_Q(y, z)] \quad (3.24)$$

Onde:

A *norma-t* (representada por $*$) é normalmente o *min* ou o *produto*, embora seja permitido usar outras *normas-t*;

Supremum (*sup*) é o menor limite superior de um conjunto S , não necessariamente pertencente a este conjunto; um limite superior que pertence ao conjunto é chamado de *maximum* (*max*). No caso de universos finitos, a operação *sup* é o *maximum*.

Considerando-se um caso especial em que uma relação P é um conjunto *fuzzy* apenas, de forma, que, em vez de $\mu_p(x, y)$, tem-se $\mu_p(x)$ (tornando-se equivalente a se ter $X = Y$), a composição torna-se somente uma função de z , denotada pela função de pertinência:

$$\mu_R(z) = \sup_x [\mu_p(x) * \mu_Q(x, z)] \quad (3.25)$$

3.3.6 - Proposições fuzzy

Neste subitem serão mostradas as várias formas de se montar uma proposição de regra em *fuzzy*, utilizando-se os operadores mais comuns. Dos pontos anteriores ficou visível que a base está na formação *se...então*, sendo assim, serão mostradas as funções dos conectores. Na aplicação proposta deste trabalho estes operadores foram utilizados e atenderam às necessidades do sistema de inferência.

Uma frase da forma $\Pi \text{ é } A$, onde Π é o nome de uma variável linguística e A é um conjunto *fuzzy* definido no universo de discurso X de Π , é chamada de proposição *fuzzy*. No caso mais geral de uma proposição em *fuzzy*, a representação se dá através do

produto cartesiano das variáveis linguísticas e da utilização de relações *fuzzy* (TANSCHKEIT, 2008).

Proposições *fuzzy* podem ser combinadas por meio de diferentes operadores, como, por exemplo, os conectivos lógicos e e ou, a negação não e o operador de implicação se ... então; as proposições *fuzzy* daí resultantes podem ser descritas em termos de relações *fuzzy*.

Em geral, o conectivo e é usado com variáveis em diferentes universos, enquanto que o conectivo ou conecta valores linguísticos de uma mesma variável, os quais estão no mesmo universo. Quando o conectivo ou é empregado para conectar variáveis em uma sentença do tipo se ... então, ele pode ser usado com duas variáveis diferentes. Por exemplo: se a pressão é alta ou a velocidade é rápida então o controle é zero.

A operação não é considerada como semanticamente sinônima da negação em linguagem natural:

$$A = \{\mu_A(x) / x\} \Rightarrow \text{não } A = \{(1 - \mu_A(x)) / x\} \quad (3.26)$$

Considerando-se:

- Variáveis linguísticas de nomes x e y definidas nos universos X e Y , respectivamente;
- Conjuntos *fuzzy* A e B definidos nos universos X e Y , respectivamente;
- Proposições *fuzzy*: $\begin{cases} x \text{ é } A \\ y \text{ é } B \end{cases}$

Conectando-se essas proposições através do conectivo ou, tem-se a proposição *fuzzy* (x é A) ou (y é B), que pode ser expressa por uma relação *fuzzy* $R_{A \text{ ou } B}$, cuja função de pertinência é dada por:

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \oplus \mu_B(y) \quad (3.27)$$

Caso as proposições sejam conectadas por conectivos e, a função de pertinência da relação $R_{A \text{ e } B}$ é dada por:

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y) \quad (3.28)$$

O operador usado para representar o conectivo ou é normalmente uma *co-norma-t*, enquanto que uma *norma-t* é utilizada na representação do conectivo e (TANSCHKEIT, 2008).

O operador se ... então é também conhecido como declaração condicional *fuzzy* e descreve a dependência do valor de uma variável linguística em relação ao valor de outra. Em muitas aplicações essas declarações condicionais são simplesmente denominadas regras linguísticas, constituindo-se em frases da forma *se x é A então y é B*. Uma frase deste tipo é normalmente denominada implicação e é representada por uma relação $R_{A \rightarrow B}$, expressa pela função de pertinência:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = f_{\rightarrow}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (3.29)$$

onde f_{\rightarrow} é o operador de implicação.

Quando uma declaração condicional apresenta mais do que uma variável antecedente x é A , as diversas variáveis são geralmente combinadas por meio do conectivo e:

$$\text{se } (x_1 \text{ é } A_1) \text{ e } (x_2 \text{ é } A_1) \text{ e } \dots \text{ e } (x_m \text{ é } A_m) \text{ então } (y \text{ é } B) \quad (3.30)$$

A declaração (3.30) pode ser representada por uma relação expressa pela função de pertinência (3.31) (TANSCHKEIT, 2008):

$$\mu_R(x_1, x_2, \dots, x_m, y) = f_{\rightarrow}(f_e(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_m}(x_m)), \mu_B(y)) \quad (3.31)$$

onde f_e é o operador (geralmente *min* ou *produto*) que representa o conectivo e.

Várias declarações também podem ser combinadas por meio do conectivo **ou**:

R^1 : se $(x \text{ é } A^1)$ então $(y \text{ é } B^1)$ ou

R^2 : se $(x \text{ é } A^2)$ então $(y \text{ é } B^2)$ ou

:

R^n : se $(x \text{ é } A^n)$ então $(y \text{ é } B^n)$

A função de pertinência do conjunto R^N de declarações é:

$$\begin{aligned} \mu_{R^N}(x, y) &= f_{ou}[\mu_{R^1}(x, y), \mu_{R^2}(x, y), \dots, \mu_{R^n}(x, y)] \\ &= f_{ou}[f_{\rightarrow}(\mu_{A^1}(x), \mu_{B^1}(y)), f_{\rightarrow}(\mu_{A^2}(x), \mu_{B^2}(y)), \dots, f_{\rightarrow}(\mu_{A^n}(x), \mu_{B^n}(y))] \end{aligned} \quad (3.32)$$

3.4 - Lógica *Fuzzy*

Aristóteles, filósofo grego (384 – 322 a.C.) foi o fundador da ciência da lógica e estabeleceu um conjunto de regras rígidas para que as conclusões pudessem ser aceitas como logicamente válidas. O emprego da lógica de Aristóteles leva a uma linha de raciocínio lógico baseado em premissas e conclusões, sendo considerada binária, pois uma declaração é verdadeira ou falsa (a declaração deve fazer parte de apenas um conjunto, o das declarações verdadeiras ou o das declarações falsas).

A lógica *fuzzy* permite uma transição gradual de uma proposição dentre os conjuntos a que esta pode pertencer, pela associação de graus de pertinência desta em relação aos conjuntos analisados. A lógica *fuzzy*, em suma, permite a dualidade, estabelecendo que algo pode coexistir com seu oposto.

Probabilidade e lógica *fuzzy* podem ser usadas para mensurar tipos de incertezas. Uma maneira de descrever a diferença entre elas é dizendo que a teoria das probabilidades lida com a expectativa de eventos futuros, baseado em fatores conhecidos. O senso de incerteza é relativo à predição de ocorrência de um evento. O senso de incerteza representado pela lógica *fuzzy* é resultante da imprecisão de significado de um conceito

expresso pela linguagem natural. Geralmente a lógica *fuzzy* trabalha com a comparação entre um indivíduo e um dado conceito impreciso.

A extensão da lógica tradicional para a lógica *fuzzy* foi efetuada através da simples substituição das funções características (ou funções de pertinência bivalentes) da primeira por funções de pertinência *fuzzy*, à semelhança da extensão de conjuntos ordinários para conjuntos *fuzzy*. Assim, a declaração condicional se x é A então y é B tem uma função de pertinência $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ que mede o grau de verdade da relação de implicação entre x e y .

Quanto à inferência, o *Modus Ponens*⁵ é estendido para o *Modus Ponens generalizado*, descrito da seguinte forma (TANSCHHEIT, 2008):

Premissa 1: x é A^*

Premissa 2: se (x é A) então (y é B)

Consequência: y é B^*

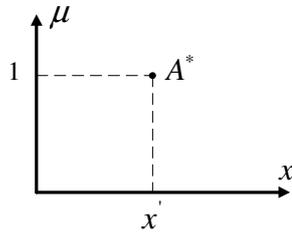
Na lógica clássica, uma regra será disparada somente se a Premissa 1 for exatamente o antecedente da regra, e o resultado será exatamente o consequente dessa regra. Na lógica *fuzzy*, uma regra será disparada se houver um grau de similaridade diferente de zero entre a Premissa 1 e o antecedente da regra; o resultado será um consequente com grau de similaridade não-nulo em relação ao consequente da regra.

Formalmente, a função de pertinência do consequente, $\mu_{B^*}(y)$, é obtida a partir do conceito de regra de inferência composicional $B^* = A^* \circ R$, na qual a conexão entre as duas proposições é representada explicitamente por uma relação R . O *Modus Ponens generalizado* (onde a relação *fuzzy* é representada de modo implícito pela regra **se... então**) é um caso especial dessa regra. Ele pode ser visto como uma composição *fuzzy*, onde a primeira relação é meramente um conjunto *fuzzy*.

⁵ Em lógica, *Modus ponens* (do Latim: *modo de afirmar*) é um dos modos dos silogismos condicionais.

Representando graficamente:

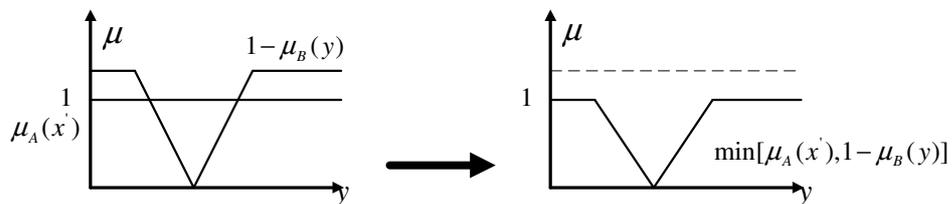
- Premissa 1 (informação ou entrada):



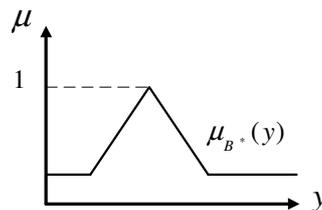
- Regra (implicação): se A então B



- Operações (passo a passo), observando que:



- Resultado final (consequente ou saída):



Para a implicação considerada, observa-se que o resultado de uma regra específica, cujo consequente é associado a um conjunto *fuzzy* com suporte finito, é um conjunto *fuzzy* com suporte infinito. Este comportamento, que é observado também para outras implicações, viola o senso comum, de importância em aplicações de engenharia (TANSCHKEIT, 2008).

Assim, os primeiros problemas de aplicação de lógica *fuzzy* situaram-se na área de Controle, quando foram definidas as implicações *min* e *produto*, que têm sido, desde então, as mais usadas em engenharia (TOMSOVIC, 2000, TANSCHHEIT, 2008). A tabela verdade destas implicações, em lógica proposicional tradicional, mostra que a implicação é verdadeira somente quando ambos, o antecedente e o conseqüente, forem verdadeiros (como a tabela verdade de \underline{e}). O uso da implicação *min* fornece como resultado:

$$\mu_{B^*}(y) = \mu_A(x') \wedge \mu_B(y) \quad (3.33)$$

Considerando funções de pertinência triangulares, por exemplo, a função de pertinência $\mu_{B^*}(y)$ terá uma forma trapezoidal, conforme pode ser visto na Figura 4. O uso da implicação *produto* fornece a função de pertinência $\mu_{B^*}(y)$, também mostrada na mesma figura. Com ambas as implicações, $\mu_{B^*}(y)$ corresponde a um conjunto *fuzzy* associado exatamente com o conseqüente da regra e com suporte finito. Além disso, pode ser verificado que $\mu_{B^*}(y) = 0$ para todo $x = x'$, o que é muito mais condizente com aplicações em engenharia (TANSCHHEIT, 2008).

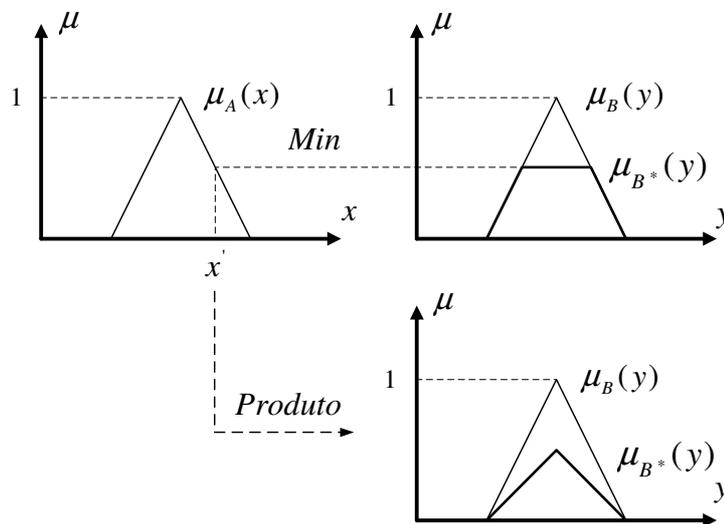


Figura 4 – Exemplo de Uso das Implicações *Min* e *Produto*⁶

⁶ Fonte: FERREIRA, L. C. A., 2008, Análise a longo-termo da estabilidade de tensão utilizando métodos estáticos e um sistema especialista fuzzy para representação de ações de controle. Tese D.Sc., Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, Brasil, p. 257.

O grau de pertinência de x' em A estabelece o grau de ativação de uma determinada regra. Quanto mais a entrada for compatível com o antecedente da regra, mais peso terá o seu consequente no resultado final. Se $\mu_A(x') = 1$, indicando "compatibilidade total" de x' com A , B^* será o próprio conjunto B .

Foi visto nas seções anteriores que vários antecedentes conectados por e, assim como sentenças linguísticas (ou regras) conectadas por ou, podem ser traduzidas matematicamente por meio do ferramental de lógica *fuzzy* (faz-se uso dos operadores f_e , f_{ou} e f_{\rightarrow}).

De uma maneira geral utilizam-se *normas-t* em associação com a implicação. Quanto aos operadores f_e e f_{ou} , normalmente utilizam-se *normas-t* (particularmente *min*) em associação com o primeiro, e *co-normas-t* (particularmente *max*) em associação com o segundo. No *modus ponens generalizado*, a *norma-t* mais utilizada é *min*, dando origem à regra de inferência *max-min* (ou *sup-min*) (TANSCHHEIT, 2008).

3.5 - Sistemas de Inferência *Fuzzy*

Nesta seção é buscada uma maior aproximação da teoria dos conjuntos *fuzzy* com a sua aplicação prática. A arquitetura de modelo de um sistema *fuzzy* é modelada de forma a representar variáveis de controle e solução e o gerenciamento da execução das proposições *fuzzy* (regras).

Sistemas *fuzzy* têm sido aplicados com sucesso em campos com controle automático, classificação de dados, tomada de decisão e sistemas especialistas. Pela sua natureza multidisciplinar, sistemas *fuzzy* são nomeados como sistemas *fuzzy* baseados em regras, sistemas especialistas *fuzzy*, sistema de modelagem *fuzzy*, sistemas de memória associativa *fuzzy*, controladores lógicos *fuzzy*.

O termo "inferência *fuzzy*" é utilizado para representar o processo de mapeamento de uma entrada de dados para uma saída usando lógica *fuzzy*. Este mapeamento fornece uma base de quais decisões podem ser tomadas, considerando funções de pertinência, operadores lógicos *fuzzy* e regras do tipo *se...então*.

No estágio de inferência ocorrem as operações com conjuntos *fuzzy* propriamente ditas: combinação dos antecedentes das regras, implicação e *modus ponens* generalizado. Os conjuntos *fuzzy* de entrada, relativos aos antecedentes das regras, e o de saída, referente ao consequente, podem ser definidos previamente ou, alternativamente, gerados automaticamente a partir dos dados.

O mapeamento dos dados precisos para os conjuntos *fuzzy* (de entrada) relevantes é realizado no estágio de *fuzificação*. Neste estágio ocorre também a ativação das regras relevantes para uma dada situação.

A função de ligação entre o grau de verdade em relação as regiões *fuzzy* é chamado de método de implicação. A ligação funcional entre regiões *fuzzy* e o valor esperado de um ponto é chamado de método de *defuzificação*.

No seu conjunto, estes conceitos constituem-se na espinha dorsal do raciocínio aproximado, combinando os atributos de proposições *fuzzy* condicional e incondicional, métodos de correlação, técnicas de implicação (transferência da verdade), agregação de proposições e *defuzificação* (COSTA *et al.*, 2005).

Modelos de inferência *fuzzy* específicos são utilizados de acordo com as propriedades sintáticas definidas. Assim, o modelo de processamento definido para o sistema de conhecimento depende da forma de armazenamento de informações escolhida (REZENDE, 2005).

Os dois tipos mais empregados em aplicações práticas são os modelos de inferência *fuzzy* Mamdani (MAMDANI, 1974) e Takagi-Sugeno (TAKAGI, 1985, SUGENO, 1988).

H. Takagi e M. Sugeno propuseram um modelo de inferência *fuzzy* paramétrico, denominado como TSK. Os autores demonstraram que este modelo é um bom aproximador para sistemas que possam ser satisfatoriamente representados apenas por meio de suas relações de entrada e saída (REZENDE, 2005).

Similarmente ao modelo de Mamdani, os modelos *fuzzy* TSK são também baseados na utilização de uma base de regras condicionais de inferência. Porém, no modelo TSK os consequentes das regras, em vez de serem formados por relações *fuzzy*, compõem-se de relações paramétricas relacionando as entradas e saídas do processo. Assim, este

modelo difere do modelo de Mamdani na parte do consequente, como uma função linear das variáveis dos antecedentes da maneira mostrada por:

$$\text{Se } x_1 = A_i \text{ e } x_2 = A_j \text{ e } \dots \text{ e } x_p = A_m \text{ então } y_1 = f(x_1, x_2, \dots, x_p) \quad (3.34)$$

A função f é, em geral, um polinômio e o sistema de inferência é geralmente referenciado em função do grau deste polinômio.

É comum a utilização de um modelo TSK em substituição a um modelo matemático convencional em um esquema de controle ou modelagem de sistemas reais. Por suas propriedades sintáticas, é bastante comum a utilização deste modelo para aproximação de funções não-lineares. A existência de funções paramétricas nos consequentes de suas regras e a facilidade de se ajustarem a partir de um conjunto de dados de entrada e saída faz com que eles sejam intrinsecamente relacionados com a tarefa de aproximação de funções em geral, embora modelos de Mamdani também possam ser utilizados com este objetivo (REZENDE, 2005).

O modelo Mamdani de inferência *fuzzy* é o mais empregado, desde o surgimento dos primeiros sistemas *fuzzy* de controle. Inspirada na teoria proposta por Zadeh, Embrahim Mamdani propôs seu modelo de inferência com o propósito de controlar uma combinação de máquina à vapor e caldeira, através da sintetização de um conjunto de regras linguísticas baseada na experiência de operadores humanos. Neste modelo, as regras de produção possuem relações *fuzzy*, tanto em seus antecedentes, como em seus consequentes.

O modelo de Mamdani inclui módulos de interface que transformam as variáveis de entrada em conjuntos *fuzzy* equivalentes e, posteriormente, as variáveis *fuzzy* geradas em variáveis numéricas proporcionais, adequadas para os sistemas de atuação existentes.

A Figura 5 mostra um diagrama típico de um sistema de processamento de conhecimento *fuzzy* que utiliza o modelo de inferência de Mamdani (FERREIRA, 2008).

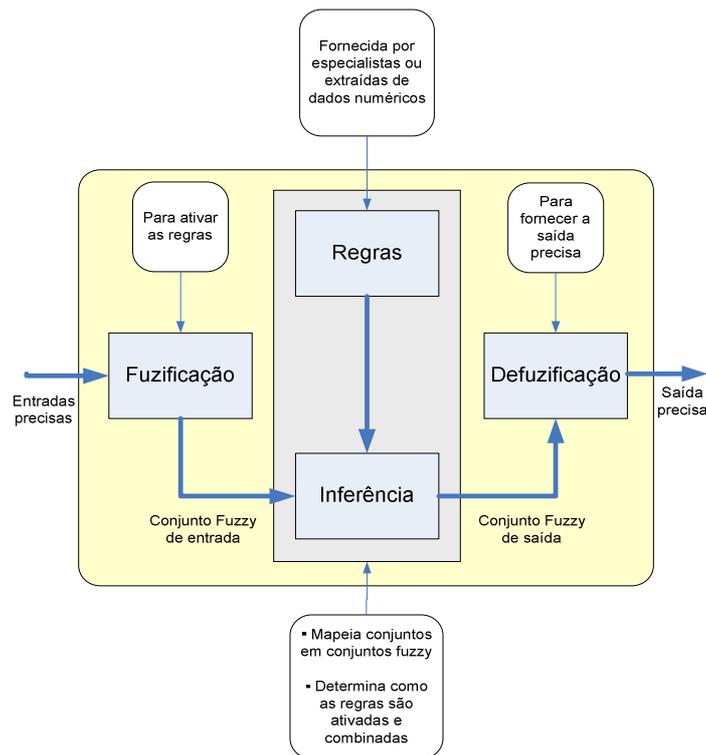


Figura 5 – Diagrama Típico de um Modelo de Inferência de Mamdani⁷

3.5.1 - Fuzificação

A Figura 5 mostra que o sistema de inferência considera entradas *não-fuzzy*, ou precisas (ou *crisp*) – resultantes de sistemas convencionais de aquisição, baseados em grandezas numéricas (como um medidor ou um sistema de supervisão e controle) – como é o caso da grande maioria das aplicações práticas.

O mapeamento dos dados necessários para os conjuntos *fuzzy* (de entrada) relevantes é realizado no estágio de *fuzificação*. É neste módulo que se mostra a grande importância do especialista do processo a ser analisado, pois a cada variável de entrada devem ser atribuídos termos linguísticos que representam os estados desta variável e, a cada termo linguístico, deve ser associado um conjunto *fuzzy* por uma função de pertinência. Neste estágio ocorre também a ativação das regras relevantes para uma dada situação.

⁷ Fonte: FERREIRA, L. C. A., 2008, Análise a longo-termo da estabilidade de tensão utilizando métodos estáticos e um sistema especialista fuzzy para representação de ações de controle. Tese D.Sc., Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, Brasil, p. 260.

As regras podem ser fornecidas por especialistas, em forma de sentenças linguísticas, e se constituem em um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência *fuzzy*, podendo ser considerado o núcleo do sistema. Extrair regras de especialistas na forma de sentenças do tipo *se ... então* pode não ser uma tarefa fácil. Alternativamente ao uso de especialistas para a definição da base de regras, existem métodos de extração de regras de dados numéricos, sendo estes métodos particularmente úteis em problemas de classificação e previsão de séries temporais (TANSCHKEIT, 2008).

3.5.2 - Inferência

No estágio de inferência ocorrem as operações com conjuntos *fuzzy* propriamente ditas: combinação dos antecedentes das regras, implicação e *modus ponens generalizado*. Os conjuntos *fuzzy* de entrada, relativos aos antecedentes das regras, e o de saída, referente ao conseqüente, podem ser definidos previamente ou, alternativamente, gerados automaticamente a partir dos dados.

Na inferência se definem quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação *fuzzy* que modela a base de regras. É deste módulo que depende o sucesso do sistema *fuzzy*, já que ele fornecerá a saída (controle) *fuzzy* a ser adotado pelo controlador a partir de cada entrada *fuzzy*.

No diagrama mostrado na Figura 5, a máquina de inferência recebe valores *fuzzy* proveniente do módulo de interface de entrada, processa as regras existentes na base de conhecimento e gera um conjunto *fuzzy* de saída para o módulo de interface correspondente, a partir da composição de todas as regras disparadas. Por uma regra disparada, entende-se uma regra cujo processamento do antecedente para as entradas atuais gerou graus de pertinência não-nulos, ou seja, a relação *fuzzy* entre as entradas e os termos primários do antecedente é maior do que zero.

Uma vez que as pertinências apropriadas foram dadas a cada regra, o método de implicação é implementado. Um conseqüente é um conjunto *fuzzy* representado por uma função de pertinência, que ponderará apropriadamente as características linguísticas que são atribuídas a estas. O conseqüente é re-moldado usando uma função associada com o antecedente (um número). A entrada para o processo de implicação é um número apenas

dado pelo antecedente, e a saída é um conjunto *fuzzy*. A implicação é implementada para cada regra.

A regra semântica tradicionalmente utilizada para o processamento de inferências com o modelo Mamdani é chamada de inferência *Max-Min*. Ela utiliza as operações de união e de interseção entre os conjuntos, por meio de operadores de máximo e de mínimo, respectivamente (TANSCHKEIT, 2008).

3.5.3 - Defuzificação

Uma vez obtido o conjunto *fuzzy* de saída através do processo de inferência (*modus ponens generalizado*), no estágio de *defuzificação* é efetuada uma interpretação dessa informação, por serem geralmente requeridas, em aplicações práticas, saídas precisas.

Usando as regras gerais de inferência *fuzzy*, a avaliação de uma proposição produz um conjunto *fuzzy* associado com cada modelo de solução variável.

O processo de *defuzificação* ou de decomposição, envolve encontrar um valor que melhor representa a informação contida no conjunto *fuzzy*. Este processo produz o valor esperado da variável para uma execução particular de um modelo *fuzzy*.

No estágio de *defuzificação* as ações de controle *fuzzy* inferidas são transformadas em ações de controle *não-fuzzy*. Em seguida, há um escalamento, de modo a compatibilizar os valores normalizados, vindos do estágio anterior, com os valores dos universos de discurso reais das variáveis.

Existem vários métodos de *defuzificação* na literatura, porém a escolha do método pode impactar significativamente a velocidade e a precisão do controle *fuzzy* (TSOUKALAS, 1997).

Após a inferência da ação de controle *fuzzy*, é necessária a determinação de uma ação de controle *não fuzzy* que melhor represente a decisão *fuzzy*, para ser efetivamente enviada ao controle. Apesar de não haver nenhum procedimento sistemático para a escolha da estratégia de *defuzificação*, as mais comuns incluem: o critério do máximo (MAX), que escolhe o ponto onde a função inferida tem seu máximo, a média dos máximos (MDM), que representa o valor médio dentre todos os pontos de máximo quando existe mais de

um máximo, e o método do centro de área (CDA), que retorna o centro de área da função inferida, conforme Figura 6 (GOMIDE, 2002).

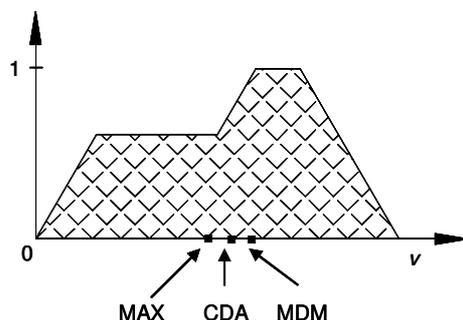


Figura 6 – Métodos de Defuzificação⁸

Os dois métodos de *defuzificação* mais empregados são o centro de gravidade (ou centro de massa, centróide, centro de área) e a média dos máximos (ZIMMERMANN, 1996, PEDRYCZ, 1998, TOMSOVIC, 2000, TANSCHAIT, 2008).

A técnica centróide encontra o ponto de equilíbrio da região solução *fuzzy* pelo cálculo da média ponderada da região *fuzzy*. Uma *defuzificação* por centróide acha um ponto que representa o centro de gravidade do conjunto *fuzzy*.

As desvantagens potenciais do método do centro de gravidade estão associadas com o favorecimento de valores “centrais” da variável de base, lentidão e a produção de resultados sensíveis a todas as regras participantes do processo de inferência (PEDRYCZ, 1998).

No método da média dos máximos, o valor numérico da saída é o ponto do universo de discurso que corresponde à média dos pontos de máximo locais da função de pertinência do conjunto de saída, produzida pelo processo de inferência.

A questão da seleção do método de *defuzificação* é um problema de tomada de decisões multicritério e permanece em aberto, demandando pesquisas por métodos mais sofisticados como os associados com interpretações probabilísticas (JUNGES, 2000).

⁸ FONTE: GOMIDE, F. A. C., GUDWIN, R. R., TANSCHAIT, R., 2002, Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial – DCA, p. 15.

Um aspecto importante e bem discutido na literatura é a questão da definição dos conjuntos *fuzzy* correspondentes às variáveis de entrada (antecedentes) e à(s) de saída (consequente(s)). Sabe-se que o desempenho do sistema de inferência depende do número de conjuntos e de sua forma, porque quanto maior o número de conjuntos atribuídos aos antecedentes, maior o custo computacional e maior a dificuldade de se estabelecer uma base de regras consistente (MEDSKER, 1995). Frequentemente uma forma linear é escolhida por razões computacionais. Independentemente do método escolhido para a representação deve-se ter em mente que a solução não deve ser muito sensível aos valores das funções de pertinência. Filosoficamente, se a precisão de uma função de pertinência é necessária para a obtenção de um resultado aceitável, então o problema provavelmente não foi definido apropriadamente ou não deve ser tratado com sistemas *fuzzy* (TOMSOVIC, 2000).

Em resumo, o desempenho de um sistema de inferência *fuzzy* depende principalmente da escolha de uma base de regras adequada, do número e forma dos conjuntos atribuídos a cada variável, da escolha do operador de implicação e do método de *defuzificação*. Desta maneira, a implementação de um sistema de controle *fuzzy* baseado no modelo de inferência de Mamdani deve observar as seguintes etapas (REZENDE, 2005):

1. Definição do universo de discurso das variáveis de entrada e saída do controlador (incluindo sua discretização, ou seja, os respectivos níveis de quantificação);
2. Partição dos universos de discurso definidos, ou seja, criação dos termos primários envolvidos e graus de pertinência dos conjuntos *fuzzy* que representam cada termo;
3. Determinação das regras que formam o algoritmo de controle (Base de Conhecimento);
4. Definição de parâmetros semânticos tais como: escolha das operações *fuzzy* adequadas, formas de conversão de variáveis de entrada e saída, tipo de atuação do controlador (tipicamente, posicional ou incremental), método de aprendizado, etc.

CAPÍTULO 4

COMPENSADORES ESTÁTICOS DE POTÊNCIA REATIVA

4.1 - Introdução

O sistema elétrico é caracterizado por estar em crescimento constante, possibilitando o avanço da economia através da expansão da oferta de energia. A expansão deste sistema depende dos investimentos em geração e transmissão, que podem ter seus cronogramas alterados por atraso das obras previstas, provocando restrições elétricas e energéticas.

O emprego de equipamentos de tecnologia *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*, estrategicamente posicionados, aumentam a segurança e a economia no sistema, reduzindo os problemas causados pelas restrições elétricas e energéticas.

O sistema elétrico brasileiro possui características distintas entre suas áreas, considerando-se sua distribuição de carga, extensão geográfica e características da sua transmissão e geração, apontando para a conveniência de estudos delimitados por áreas geoeletricas.

Este capítulo discute resumidamente os dispositivos *FACTS*, particularmente os compensadores estáticos de potência reativa, destacando suas características construtivas, especificações, e modos de operação. Especificamente, sendo objeto da aplicação do sistema especialista *fuzzy* proposto, será detalhado, construtiva e operativamente, um CE do sistema elétrico brasileiro, junto com a discussão de sua importância para a área geoeletrica em que este equipamento está inserido.

4.2 - A Tecnologia FACTS e os Compensadores Estáticos de Potência Reativa

A transferência de potência na maioria dos sistemas de transmissão é limitada por problemas de estabilidade. Estas restrições limitam a plena utilização dos corredores ou troncos de transmissão. Junto com as dificuldades econômicas para a expansão e crescentes necessidades de aprimoramento de desempenho do sistema, os equipamentos utilizando a tecnologia *FACTS* surgiram, com base em sua velocidade de atuação, como proposta de explorar de maneira segura a capacidade do sistema existente.

A tecnologia dos dispositivos *FACTS* é baseada no uso confiável da alta velocidade da eletrônica de potência, uma tecnologia de controle avançado, ancorada em microcontroladores avançados capazes de manobrar dispositivos de compensação de potência reativa de grande porte (EDRIS, 2000).

Implementações de sucesso de controladores *FACTS* permitem a correta correção da tensão de transmissão, impedância da linha, e ângulo de fase em localidades específicas do sistema de transmissão, permitindo a plena utilização do sistema de transmissão.

O conceito *FACTS* agrupa um conjunto de equipamentos de eletrônica de potência que permitem maior flexibilidade de controle dos sistemas elétricos. Neste caso, o termo *flexibilidade* deve ser entendido como a capacidade de rápida e continuamente alterar-se parâmetros com influência na dinâmica de funcionamento do sistema elétrico.

Dispositivos *FACTS* são aplicáveis, de forma mais direta, às restrições de transmissão de potência relacionadas com problemas de estabilidade. Com este objetivo, têm sido testados, por exemplo, compensadores série controlados a tiristor, compensadores em derivação e amortecedores de ressonâncias subsíncronas.

Os compensadores estáticos controlados a tiristor têm sido utilizados, preferencialmente, aos compensadores síncronos em novas instalações, em razão do seu custo, desempenho e confiabilidade. Estes equipamentos podem ser definidos como um dispositivo estático em derivação no qual a geração ou absorção de potência reativa pode ser controlada (variada), continuamente, por meio de chaves tiristoras.

O termo compensador deve-se a função do equipamento no sistema, a qual consiste em compensar dinamicamente as variações de potência reativa, provocadas por mudanças no estado do sistema. A utilização do termo estático implica na não existência de partes móveis, diferente do que ocorre em um compensador síncrono.

Os elementos principais de um sistema compensador estático são: Controladores tiristorizados, Reatâncias e Capacitâncias.

De maneira geral podem ser citados alguns objetivos no uso de compensadores estáticos em sistemas elétricos (BRANDI, 2008):

- Melhoria na regulação de tensão com controle do fluxo de potência reativa entre o sistema à montante e a carga;
- Estabilização da tensão do sistema dentro de certos limites, em torno de uma tensão de referência pré-fixada, sob condições normais de operação;
- Melhoria na estabilidade dinâmica e de regime permanente;
- Redução de sobretensões, redução das flutuações de tensão resultantes de perturbações no sistema (rejeição de carga, perda de LT, etc.);
- Redução de efeito *flicker*⁹;
- Amortecimento de oscilações subsíncronas;
- Redução de desbalanços de corrente e tensão.

A variedade de funções reguladoras, sua grande flexibilidade e sistemas de controle facilmente adaptáveis, tornam o compensador estático uma ótima solução, capaz de atender as necessidades múltiplas para qualquer configuração do sistema.

⁹ A cintilação ou piscamento de luz é definida como “impressão subjetiva de flutuação da luminância” (conforme IEX 555-1). É um fenômeno de desconforto fisiológico visual, sentido pelos usuários de lâmpadas alimentadas por uma fonte comum à iluminação e uma carga perturbadora. Disponível em: <www.proz.com>. Acesso em: 15 abril 2010.

4.2.1 - Esquemas de Compensadores Estáticos

Os esquemas de Compensadores Estáticos mais usualmente empregados são (BRANDI, 2008, LIMA, 2008):

a) Reator Controlado a Tiristor

O TCR – *Thyristor Controlled Reactor*, possui a configuração com um reator e uma válvula tiristora incorporados em cada ramo monofásico. A capacidade é modificada pelo controle da corrente através do reator por uma válvula tiristora. Este esquema é caracterizado por controle contínuo e sem transientes. A Figura 7 apresenta um exemplo de TCR.



Figura 7 – Reator Controlado a Tiristor – TCR¹⁰

As curvas características de um TCR são apresentadas na Figura 8. Nesta figura destaca-se que na faixa entre os ângulos de disparo mínimo ($\sim 90^\circ$) e máximo ($\sim 180^\circ$), o reator mantém a tensão praticamente constante de acordo com o controle do reator. Para funcionamento em regime permanente, o reator pode ser encarado como uma reatância variável (BRANDI, 2008).

¹⁰ Fonte: BRANDI, E. M., LIMA, M. V. B. C., 2008, “Compensador Estático de Potência Reativa – SVC”, *Workshop – Equipamentos FACTS: Aspectos conceituais, Tecnológicos e de Aplicação - Cigrê Brasil CE-B4*, n° 3, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 24-27 Junho, p. 15.

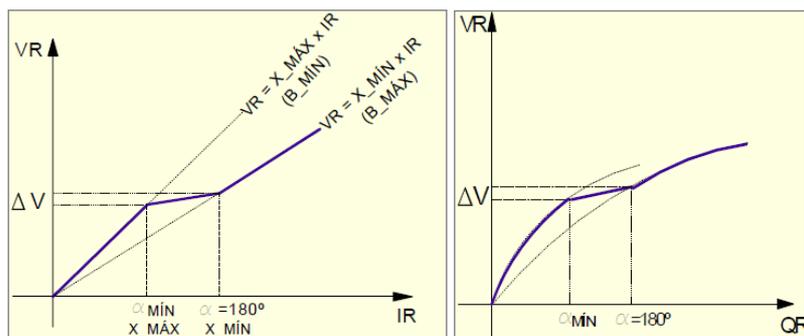


Figura 8 – Curvas características de um TCR¹¹

Na Figura 9 é mostrada uma válvula tiristora de um TCR do fabricante ABB, isolada para 15 kV, que possui dezesseis tiristores em série e dois redundantes, o TCR opera em 400 kV e possui 110 Mvar de potência.



Figura 9 – Válvula Tiristora de 15 kV de um TCR¹²

¹¹ Fonte: BRANDI, E. M., LIMA, M. V. B. C., 2008, “Compensador Estático de Potência Reativa – SVC”, *Workshop – Equipamentos FACTS: Aspectos conceituais, Tecnológicos e de Aplicação - Cigrê Brasil CE-B4*, n° 3, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 24-27 Junho, p. 16.

¹² Fonte: ABB, 2005, “FACTS (Flexible AC Transmission Systems): SVC/U”, *ABB Consulting Seminar*, Ludvika, Sweden, June, p. 24.

b) Capacitor Chaveado a Tiristor

Nos TSC (*Thyristor Switched Capacitor*) são usados tiristores em série com um conjunto de bancos de capacitores, em ligação anti-paralela, que chaveiam cada banco individualmente, proporcionando um controle por degraus (não contínuo) da potência reativa. São inseridos reatores em série com o capacitor para limitar a corrente de *inrush*.

Durante a operação, quando o ângulo de disparo é 90° , o capacitor é inserido, e com ângulo de disparo em 0° , o capacitor é desligado (Figura 10). O controle de disparo dos tiristores se dá no instante em que a corrente passa pelo zero natural.

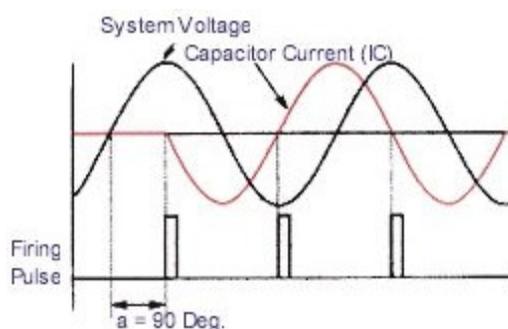


Figura 10 – Forma de Onda com a Inserção do Capacitor¹³

De maneira geral, os TSC podem se caracterizados por controle em degraus, sem transientes, sem harmônicos, baixas perdas, redundância e flexibilidade (ABB, 2005a). A Figura 11 mostra uma fotografia de um TSC existente em Furnas.

¹³ Fonte: BRANDI, E. M., LIMA, M. V. B. C., 2008, “Compensador Estático de Potência Reativa – SVC”, *Workshop – Equipamentos FACTS: Aspectos conceituais, Tecnológicos e de Aplicação - Cigrê Brasil CE-B4*, nº 3, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 24-27 Junho, p. 18.



Figura 11 – Foto do TSC - Furnas¹⁴

Os compensadores estáticos utilizando estes equipamentos podem ter esquemas de montagem distintos, tais como TSC/FR - Capacitor Chaveado a Tiristor / Reator Fixo ou TCR/FC - Reator Controlado a Tiristor / Capacitor Fixo.

Já os compensadores estáticos com configuração que integram mais componentes, tais como TCR/TSC/FC - Reator Controlado a Tiristor / Capacitor Chaveado a Tiristor e Capacitor Fixo, são intitulados de esquema híbrido.

¹⁴ Fonte: BRANDI, E. M., LIMA, M. V. B. C., 2008, “Compensador Estático de Potência Reativa – SVC”, *Workshop – Equipamentos FACTS: Aspectos conceituais, Tecnológicos e de Aplicação - Cigrê Brasil CE-B4*, n° 3, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 24-27 Junho, p. 19.

4.3 - A utilização de Compensadores Estáticos ao redor do mundo

Com o objetivo de ampliar a noção de uso de compensadores estáticos, nesta seção são apresentados algumas aplicações internacionais deste equipamento, assim como, suas principais funções em cada sistema (ABB, 2003, ABB, 2005).

a) Noruega

Numa instalação chave da região sudeste do sistema da Noruega, onde ocorre o encontro de várias linhas de transmissão de 300 kV e 420 kV, está instalado, no setor de 420 kV da subestação de *Sylling*, um CE de $-/+ 160$ Mvar, no esquema TCR/TSC (Figura 12). Este CE foi instalado para substituir um compensador síncrono avariado, representando um importante ganho de equipamento de compensação para a área, com custo mais baixo que um novo compensador rotativo. A operação deste CE ocorre em paralelo com um compensador síncrono de 160 MVA, também presente nesta subestação.

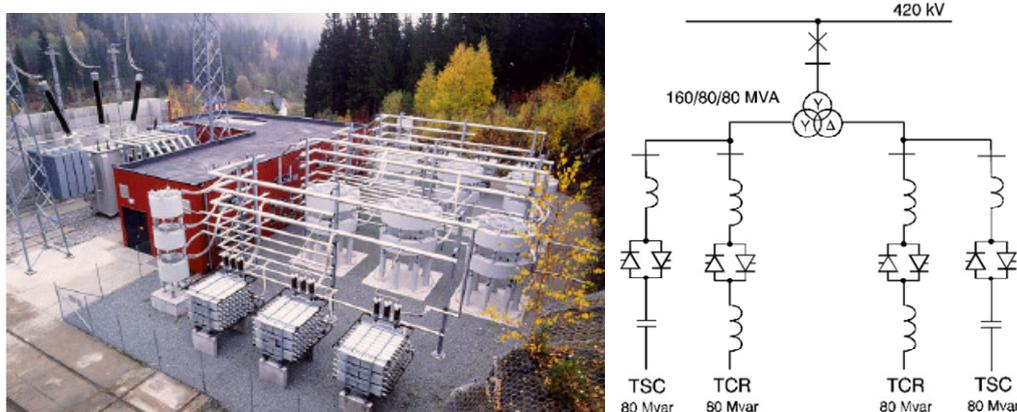


Figura 12 – Foto e Esquema de Montagem do CE de Sylling¹⁵

A função do CE de *Sylling* é aumentar o controle dinâmico da tensão e o controle do fluxo de potência reativa na parte sudoeste da rede, caracterizada por elevado carregamento e longe de fontes de geração. Conseqüentemente previne o colapso de tensão em caso de perda de linhas ou de blocos geração, além de garantir a estabilidade da tensão sob várias condições da rede.

¹⁵ Fonte: Adaptado de ABB, 2005, “FACTS (Flexible AC Transmission Systems): SVC/U”, ABB Consulting Seminar, Ludvika, Sweden, June, p. 25 e 28.

A opção pelo CE permitiu um crescimento na potência ativa transmitida no sistema existente, se tornando uma alternativa mais atrativa do que a instalação de novas linhas de transmissão, por apresentar menor custo de investimento, menor tempo para sua instalação e menor impacto ao ambiente.

b) Austrália

Com o sistema de transmissão de *New South Wales*, conectando os sistemas de *Victoria* e *South Australia*, este sistema completou a interligação dos quatro estados do sul da Austrália e sua costa leste. Assim, foi estabelecido um dos mais longos sistemas de transmissão em corrente alternada, se estendendo por mais de 4.500 km de *Cairns*, no norte de *Queensland*, até *Port Augusta*, em *South Australia* (Figura 13).



Figura 13 – Interconexão em 275/330/275 kV, Leste e Sul da Austrália¹⁶

A interligação conecta o sistema existente de 275 kV em *Tarong*, no sul de *Queensland*, à rede de 330 kV existente no norte de *New South Wales*, em *Armidale*. Inclui 560 km de 275 kV e 330 kV de linhas de transmissão em circuito duplo, subestações e dois compensadores estáticos, fundamentais para manter a estabilidade entre os sistemas conectados.

Instalados nas subestações de *Blackwall* e *Braemar* (Figura 14), os CE têm como objetivo principal garantir o desempenho dinâmico, além de controlar a tensão em regime permanente, durante as variações do carregamento das linhas de transmissão,

¹⁶ Fonte: ABB, 2003, *SVC for enhancing of power transmission capability over long AC interconnector*, ABB Utilities AB Power Systems, p. 2.

permitindo a flexibilidade no controle e performance de operação otimizada em rede alterada.

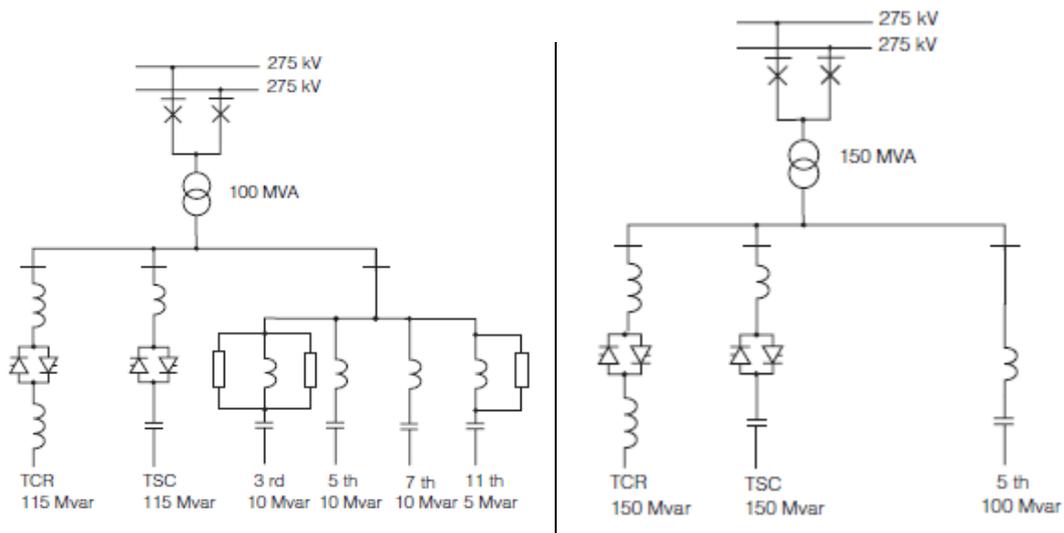


Figura 14 – Unifilares dos CE de Braemar e Blackwall¹⁷

O CE de *Braemar* tem $-80/+150$ Mvar de capacidade, provenientes de um TCR de 115 Mvar, um TSC de 115 Mvar e quatro filtros de harmônicos agrupados em segmentos de 35 Mvar cada.

O CE de *Blackwall* tem faixa de $-50/+250$ Mvar, que é fornecida por um TCR de 150 Mvar, um TSC de 150 Mvar e um filtro de 5° harmônico de 100 Mvar. Em condição máxima, à tensão nominal, o CE pode fornecer continuamente 150 Mvar, e 250 Mvar por uma hora a cada período de 24 horas.

A capacidade de transferência de energia da interligação é reduzida se um dos dois CE estiver indisponível para amortecer oscilações eletromecânicas do sistema. Isso equivale a dizer que a disponibilidade, confiabilidade e robustez dos CE são de suma importância.

Esta interligação começou a operar em 2001, e os testes confirmaram a boa performance dos CE controlando a tensão e amortecendo oscilações dentro dos limites de operação seguros.

¹⁷ Fonte: ABB, 2003, *SVC for enhancing of power transmission capability over long AC interconnector*, ABB Utilities AB Power Systems, p. 3.

Outra característica adicional destes CE, é que seus sistemas de controle permitem que estes equipamentos controlem elementos chaveados da rede (externos ao CE).

c) Canadá

No sistema de transmissão de 735 kV de *Quebec*, Canadá, de propriedade da *Hydro-Quebec*, estão operando seis compensadores estáticos. Cada um destes com faixa entre -110/+330 Mvar, distribuídos em duas unidades na SE *La Vérendrye*, de 1984, duas na SE *Chibougamau*, de 1985, e duas em *Chamouchouane*, de 1990.

O sistema de 735 kV pode transmitir um total de 15.000 MVA através de seis linhas interligando usinas hidráulicas do rio *La Grande Rivière*, em *James Bay*, abaixo do distrito de *Montreal*, algumas a mais de 1.000 km de distância ao Sul (Figura 15).

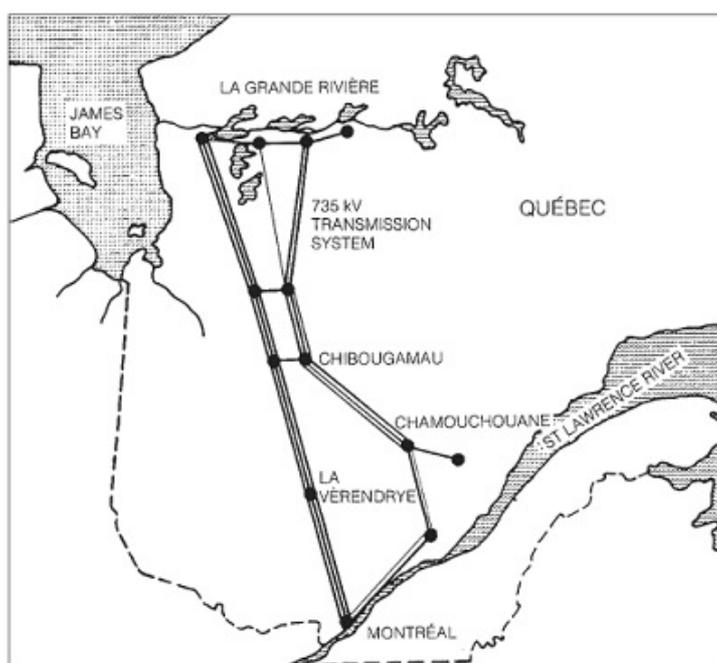


Figura 15 – Diagrama Esquemático do Sistema de 735 kV do Canadá¹⁸

O objetivo operacional destes CE também é o de estabilização da tensão durante operação normal e manter a estabilidade do sistema durante distúrbios na rede. Visando uma melhor flexibilidade da operação, dois compensadores de uma mesma estação podem operar independentemente ou em modo de controle conjunto.

¹⁸ Fonte: ABB, 2003a, SVC to stabilize large 735 kV transmission system in Canada, ABB Power Systems AB, p. 1.

O CE de *Chamoucouane* foi redimensionado para uma faixa de $-/+ 330$ Mvar, como representado na Figura 16.

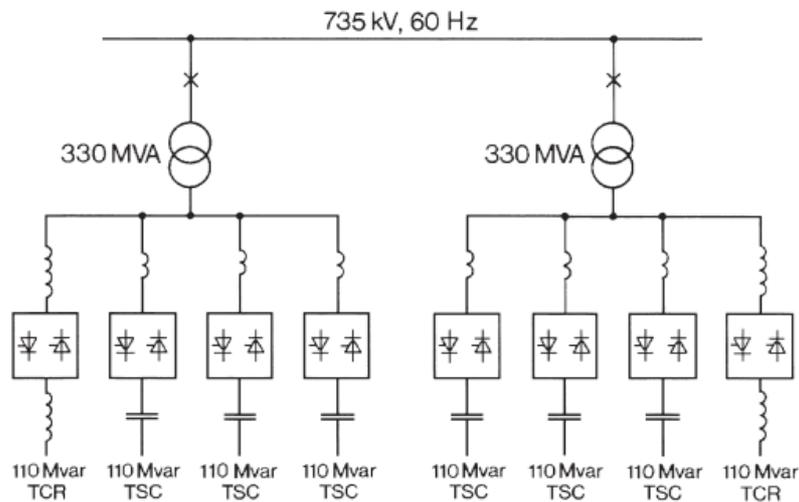
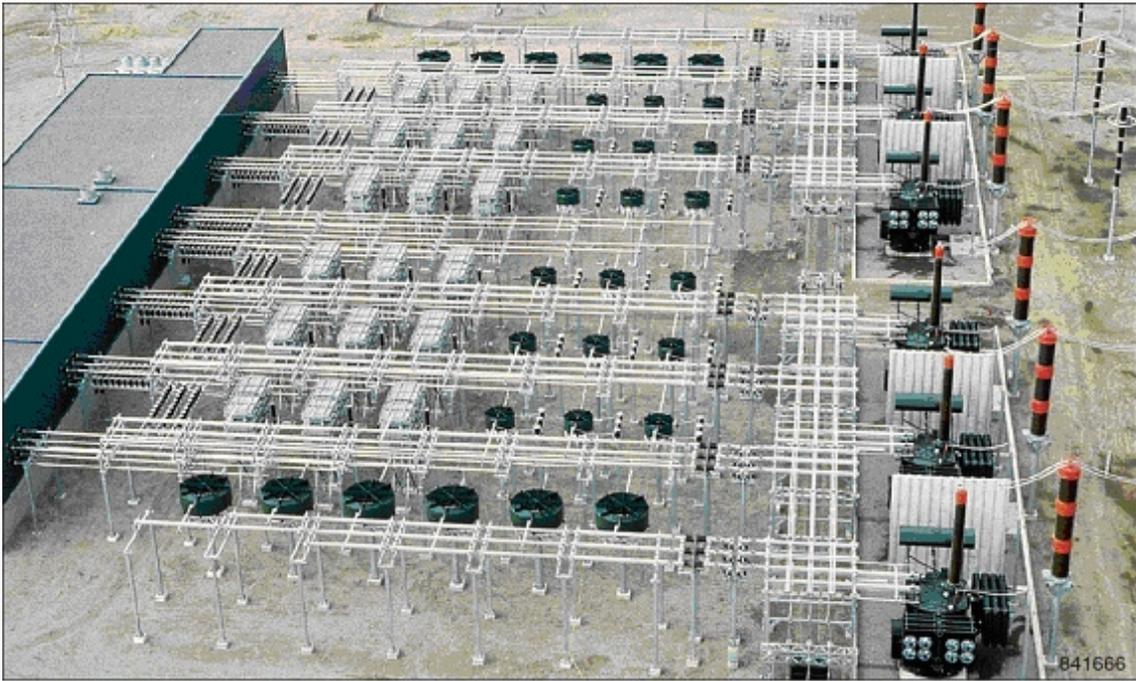


Figura 16 – Unifilar dos CE do Sistema de 735 kV no Canadá¹⁹

Na Figura 17 é possível visualizar a área necessária para a instalação dos equipamentos de um destes CE apresentados, e ainda, no *layout* estão indicadas algumas partes componentes do equipamento e o esquema de montagem.

¹⁹ Fonte: ABB, 2003a, SVC to stabilize large 735 kV transmission system in Canada, ABB Power Systems AB, p. 2.



Station layout

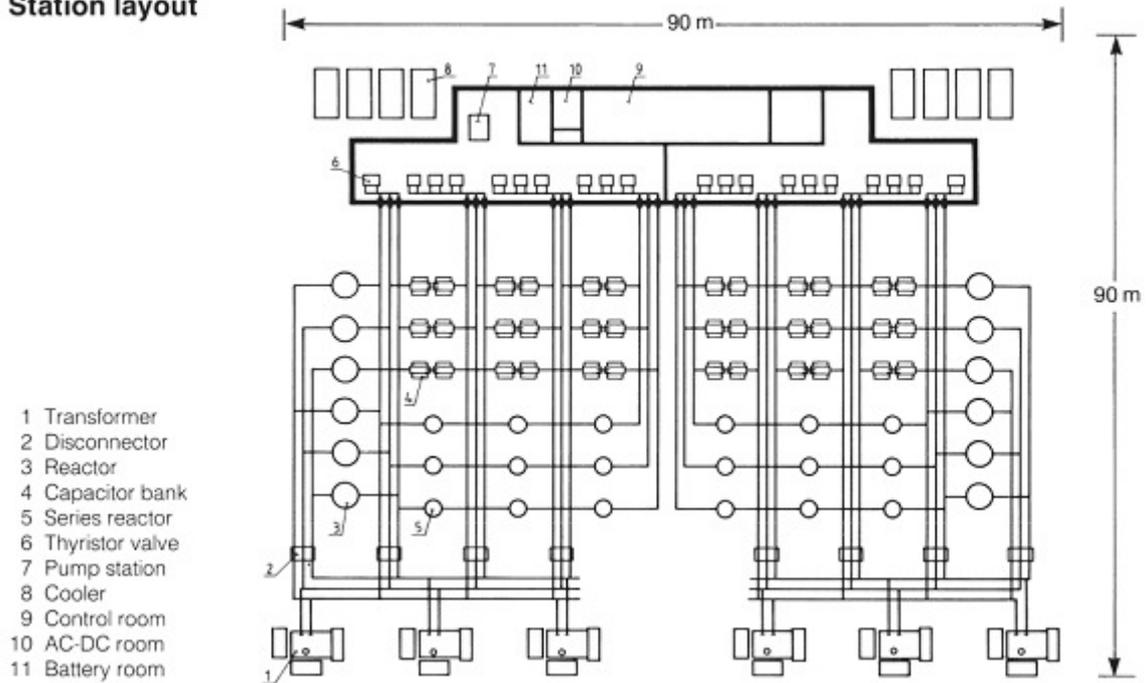


Figura 17 – Foto Aérea do CE da Hydro Quebec e Layout da Instalação²⁰

²⁰ Fonte: ABB, 2003a, SVC to stabilize large 735 kV transmission system in Canada, ABB Power Systems AB, p. 2.

4.4 - A utilização atual e futura de Compensadores Estáticos no Sistema Elétrico Brasileiro

A utilização da tecnologia *FACTS* no sistema elétrico brasileiro é mais comum através , de bancos de capacitores série controlados a tiristor (TCSC) e compensadores estáticos.

Na Tabela 6 são indicados os compensadores estáticos instalados nas localidades integrantes do SIN, sua potência e a região elétrica em que este se encontra inserido. Vale lembrar que esta tabela representa os compensadores estáticos instalados na rede básica e que são controlados pelo ONS.

Verifica-se que a maior incidência está nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, acompanhadas da região Centro-Oeste, nesta última região, em função do seu recente e acelerado crescimento de carga observado.

Tabela 6 – Compensadores Estáticos Instalados no SIN²¹

Subestação	Potência (Mvar)	Proprietário	Estado	Região elétrica
Bandeirantes	-50 / +100 (x2) ¹	FURNAS	Goiás	500/345 kV da Área Goiás/Brasília
Barro Alto	-30,5 / 24,5	FURNAS	Goiás	500/345 kV da Área Goiás/Brasília
Bom Jesus da Lapa II	-250 / 250	TSN	Bahia	Interligação Sudeste - Nordeste
Campina Grande II	0 / +100 (x2)	CHESF	Paraíba	500/230 kV Leste da região Nordeste
Campos	-60 / 100	FURNAS	Rio de Janeiro	500/345 kV do Rio de Janeiro/Espírito Santo
Coxipó	-50 / 70	ELETRONORTE	Mato Grosso	500/230 kV do Mato Grosso
Fortaleza	-70 / +100 (x2)	CHESF	Ceará	500/230 kV Norte da região Nordeste
Funil	-100 / 200	CHESF	Bahia	500/230 kV Sul da região Nordeste
Milagres	-35 / +58 (x2)	CHESF	Ceará	Interligação Norte - Nordeste
Mossoró II	0 / 20	CHESF	Ceará	500/230 kV Norte da região Nordeste
Natal II	0 / 20 (x2)	CHESF	Rio Grande do Norte	500/230 kV Leste da região Nordeste
Ouro Preto II	-80 / 20	CEMIG	Minas Gerais	500/345 kV de Minas Gerais
São Luís II	-100 / 150	ELETRONORTE	Maranhão	500/230 kV do Maranhão
Sinop	-20 / 55	ELETRONORTE	Mato Grosso	500/230 kV do Mato Grosso

¹ – Indica o número de compensadores instalados nesta SE

Como exemplo de usos de TCR/FC - Reator Controlado a Tiristor / Capacitor Fixo cita-se o CE de Barro Alto, de Furnas (Figura 18), onde o CE, com potência de -30,5 / +24,5 Mvar possui um TCR, filtros de harmônicos, e controla dois elementos externos, um banco de capacitores de 27,2 Mvar e um reator de 15 Mvar, conectados à barra de 230 kV da SE.

²¹ Fonte: Reunião de dados dos Procedimentos de Rede do ONS, Módulo 10. Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: fevereiro de 2010.

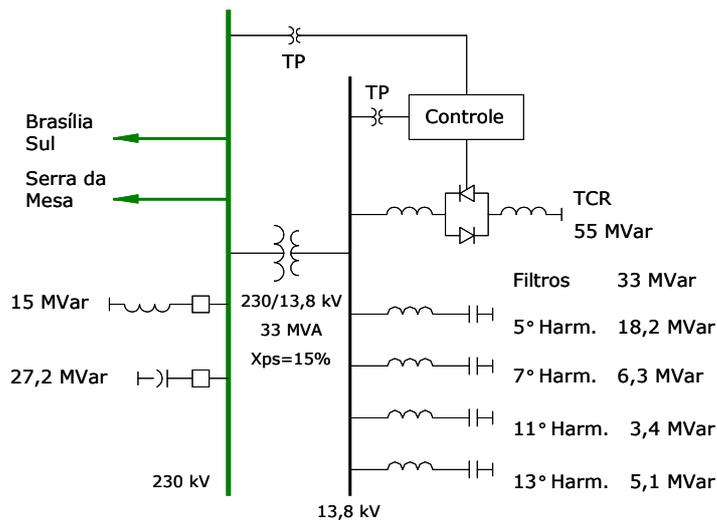


Figura 18 – Esquema de CE com TCR + FC - SE Barro Alto²²

O compensador estático da SE Bandeirante, também de propriedade de Furnas, pode ser citado como exemplo de um compensador estático com uma configuração (Figura 19) capaz de integrar mais componentes, como as observadas em esquemas híbridos, contidas em TCR/TSC/FC - Reator Controlado a Tiristor / Capacitor Chaveado a Tiristor e Capacitor Fixo. Esta instalação conta com um sistema estático de compensação de potência reativa, com dois CE de -50 / +100 Mvar, capaz de controlar dispositivos externos de controle de tensão (dois reatores de 60 Mvar e um banco de capacitores de 91,5 Mvar, ambos conectados à barra de 345 kV), com o objetivo de redução do porte do CE necessário para tal controle.

²² Fonte: BRANDI, E. M., LIMA, M. V. B. C., 2008, “Compensador Estático de Potência Reativa – SVC”, *Workshop – Equipamentos FACTS: Aspectos conceituais, Tecnológicos e de Aplicação - Cigrê Brasil CE-B4*, n° 3, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 24-27 Junho, p. 20.

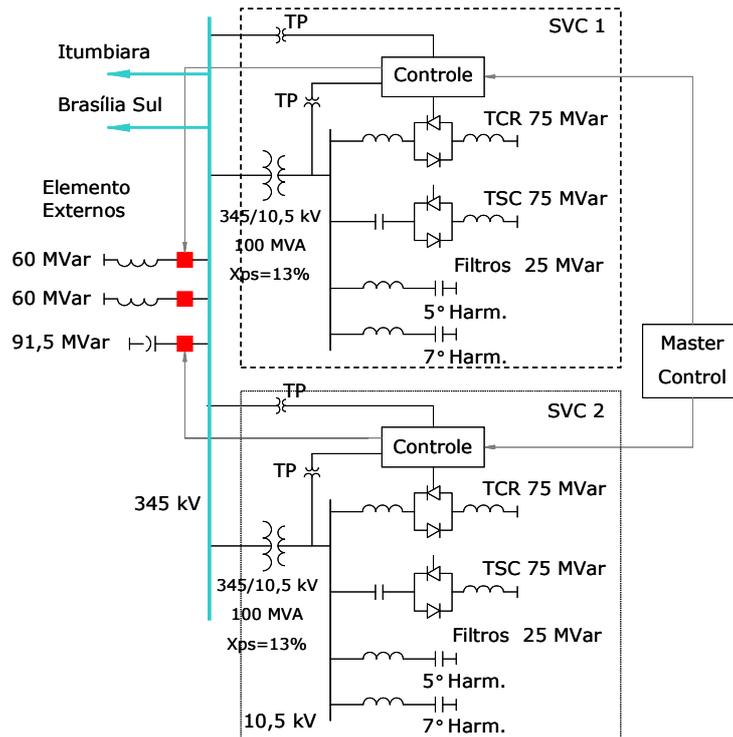


Figura 19 – CE em Esquema Híbrido – SE Bandeirantes²³

É notório que a expansão do sistema de transmissão vem, cada vez mais, buscando o emprego de dispositivos *FACTS*, pela sua flexibilidade e segurança, aliada à redução do seu custo com o avanço tecnológico. Assim, a Tabela 7 mostra, em um curto horizonte de dois anos, os compensadores estáticos previstos para entrada em operação no SIN.

Verifica-se que esta expansão se concentra na região Norte e Nordeste, considerando os novos empreendimentos de geração nestas regiões e os extensos troncos de transmissão para o escoamento da energia para os grandes centros de carga, na sua maior parte, concentrados na região Sudeste.

²³ Fonte: BRANDI, E. M., LIMA, M. V. B. C., 2008, “Compensador Estático de Potência Reativa – SVC”, *Workshop – Equipamentos FACTS: Aspectos conceituais, Tecnológicos e de Aplicação - Cigrê Brasil CE-B4*, n° 3, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 24-27 Junho, p. 33.

Tabela 7 – Compensadores Estáticos Previstos para o SIN²⁴

Instalação	Potência (Mvar)	Estado	Previsão
Imbirussu	-100 / 100	Mato Grosso do Sul	out/2010
Vilhena	-50 / 100	Rondônia	mai/2011
Santos Dumont II	-84 / 100	Minas Gerais	mai/2011
Oriximiná	-200 / 200	Pará	out/2011
Macapá	-100 / 100	Amapá	out/2011
Rio Branco I	-20 / 55	Acre	nov/2011
Itacoatiara	-200 / 200	Amazonas	dez/2011
São Luis II	-100 / 150	Maranhão	dez/2011
Padre Fialho	-90 / 100	Minas Gerais	abr/2012
Jurupari	-200 / 200	Pará	dez/2012

4.5 - Compensador Estático da SE Campos

Nesta seção são detalhadas as características e funcionamento do compensador estático de propriedade de Furnas (BRANDI, 2001, BRANDI, 2008), considerando que este equipamento será usado, em um capítulo seguinte deste trabalho, como exemplo de aplicação do sistema especialista *fuzzy* proposto.

O compensador estático localizado no setor de 345 kV da SE de Campos possui dois reatores controlados a tiristor (TCR), duas unidades de filtros sintonizados e duas unidades de chaveamentos de elementos externos. Este equipamento opera em 15 kV e

²⁴ Fonte: Dados colhidos de EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2008, *Estudos para Licitação da Expansão da Transmissão - Consolidação das Análises e Pareceres Técnicos - Programa de Expansão da Transmissão – PET ciclo 2009-2013 N° EPE-DEE-RE-139/2008-r0*, EPE. Disponível em: <www.epe.gov.br>. Acesso em: 10 de maio de 2010.

é conectado ao barramento de anel de 345 kV da SE, através de um transformador de 100 MVA (Figura 20).

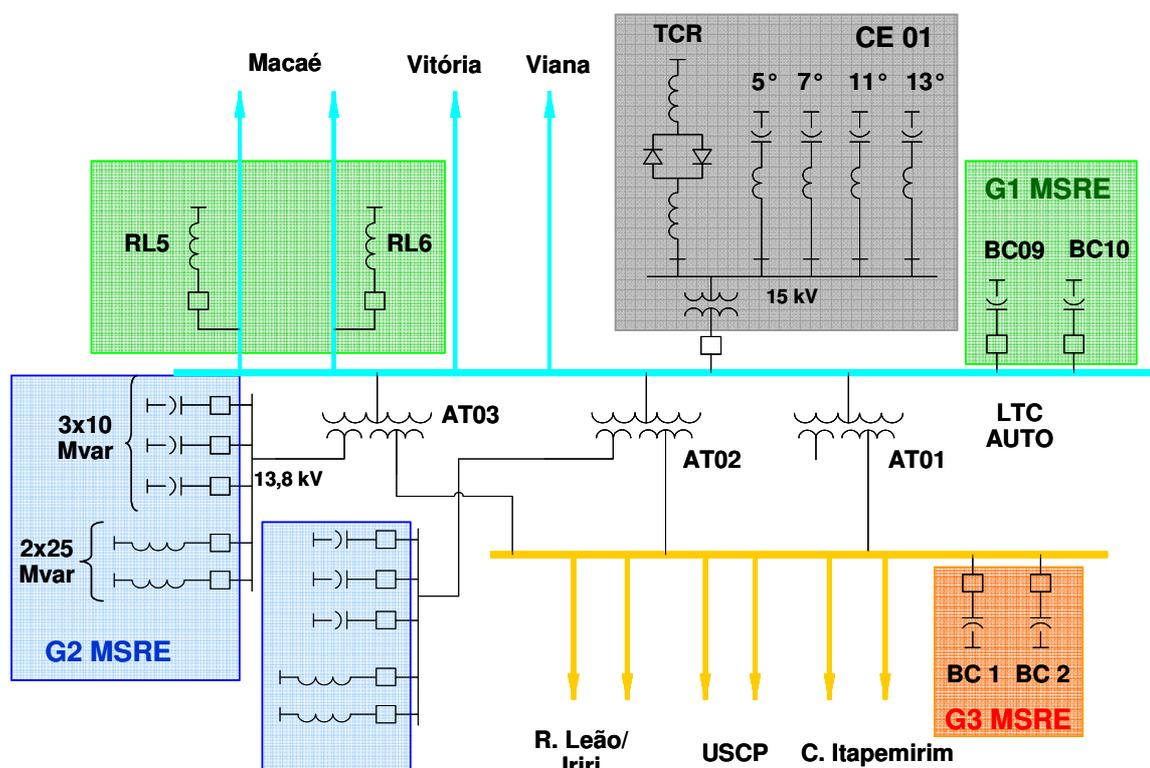


Figura 20 – Diagrama Simplificado da SE Campos com os Grupos de Chaveamento do CE

Durante a sua operação normal este CE realiza o controle rápido da barra de alta tensão de 345 kV de acordo com sua curva característica $V \times I$. O CE controla a barra de alta através do ajuste da potência reativa absorvida, pelo ajuste do controle do ângulo de disparo dos tiristores do TCR.

Em complementação a ação de controle rápido de tensão, o CE realiza a ação de controle de regime permanente, fornecendo a demanda de potência reativa requerida pelo sistema, mantendo o ponto de operação do CE em uma região pré-definida (ponto de flutuação), através do chaveamento dos elementos externos, assegurando uma reserva dinâmica de potência reativa durante contingências no sistema.

O compensador estático tem uma faixa de operação de -60 Mvar à $+100$ Mvar, referida a barra de 345 kV para 1 pu de tensão.

O CE possui dois reatores de 83 Mvar controlados a tiristor e bancos de filtros sintonizados para tratamento de 5° harmônico (20,49 Mvar), 7° harmônico (35,14

Mvar), 11° harmônico (13,64 Mvar) e 13° harmônico (21,03 Mvar), todos tendo como tensão de referência 1 pu na barra de baixa, em 15 kV, do equipamento.

4.5.1 - Funcionamento da Lógica de Chaveamento dos Elementos Externos

Além de seus equipamentos internos, o CE de Campos tem o recurso o chaveamento de elementos de controle de tensão da SE Campos, externos ao CE, através da lógica MSRE (*Mechanical Switched Reactive Elements*), à saber (Figura 20):

- Na barra de 345 kV → dois bancos de capacitores de 60 Mvar (BC-09 e BC-10);
- No terminal de Campos das LT 345 kV Campos – Macaé circuitos 1 e 2 → dois reatores de 60 Mvar, um em cada linha (RL-05 e RL-06);
- Na barra de 138 kV → dois capacitores, sendo um de 50 Mvar (BC-01) e outro de 53,2 Mvar (BC-02);
- Em cada uma das duas barras em 13,8 kV do terciário dos transformadores 345/138 kV → dois reatores de 25 Mvar e três bancos de capacitores de 10 Mvar.

As unidades de elementos externos chaveados mecanicamente são divididas em três grupos:

- Grupo G1 MSRE contendo os dois capacitores de 60 Mvar e dois reatores de 60 Mvar;
- Grupo G2 MSRE com os dois conjuntos de três bancos de capacitores (3 x 10 Mvar) e dois reatores (2 x 25 Mvar);
- Grupo G3 MSRE com os bancos de capacitores de 50 Mvar e 53,2 Mvar.

O controle do compensador estático associado a sua lógica de chaveamento de elementos externos possui alguns requisitos principais que devem ser atendidos ao longo da operação do sistema, são eles:

1. Chavear os elementos externos de forma a manter o ponto de operação do CE dentro de uma área pré-definida, próximo de zero Mvar de saída;
2. Restabelecer as condições de repouso dos elementos externos.

A condição de repouso dos elementos externos relativos ao grupo G1 (BC 60 Mvar e RT 60 Mvar) e em particular os reatores do grupo G2 (RT 25 Mvar) é que estejam em operação e energizados. Para os demais elementos não há uma posição de repouso preestabelecida e esta condição dependerá do ponto de operação do sistema.

4.5.2 - Região de Operação do CE de Campos

O MSRE do compensador estático da SE Campos, quando ligado, atua nos bancos de capacitores e reatores *shunt* dos setores de 345 e 138 kV que estiverem habilitados para serem controlados pelo CE.

Para o estabelecimento das estratégias de chaveamento de elementos externos algumas regiões de operação do CE foram definidas em função da sua variável de saída e seus limites (Figura 21), que são utilizadas para determinar o momento da habilitação e chaveamento dos elementos externos.

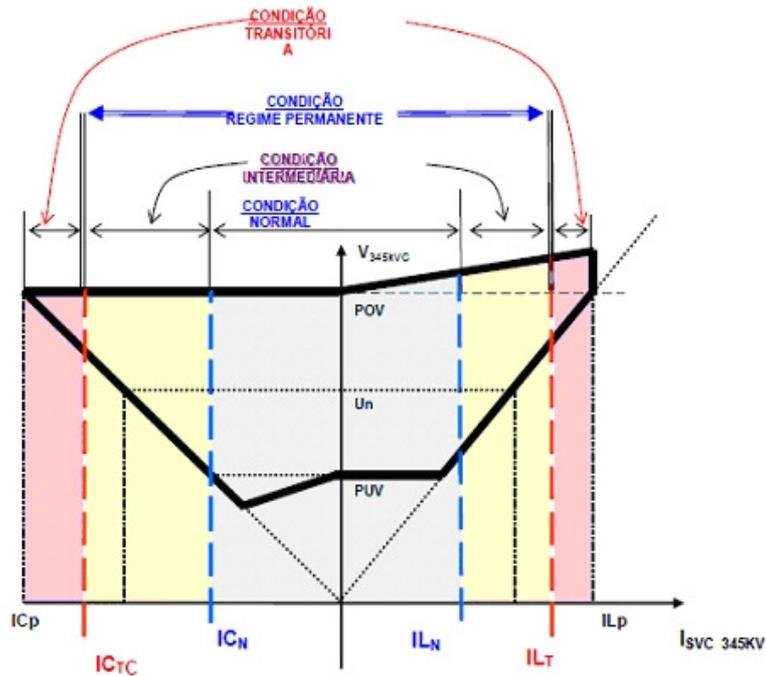


Figura 21 – Região de Operação do CE de Campos²⁵

Limite da condição normal:

- **IC_N** : Condição Normal Limite Capacitivo = 45 Mvar
- **IL_N** : Condição Normal Limite Indutivo = -15 Mvar

Limites transitórios:

- **IC_{TC}** : Limite Transitório Capacitivo = 80 Mvar
- **IL_T** : Limite Transitório Indutivo = -50 Mvar

Limite de regime permanente:

- **IC_P**: Limite Permanente Capacitivo = 100 Mvar
- **IL_P** : Limite Permanente Indutivo = -60 Mvar

²⁵ Fonte: BRANDI, E. M., PAIVA, M. A. F., 2001, Nota Técnica DEE.O.003.2001 – Comissionamento do Compensador Estático de Campos -60/+100 Mvar / 345 kV, FURNAS Centrais Elétricas, Julho, p. 6.

4.5.3 - Chaveamento dos elementos externos

Uma boa maneira de se compreender a lógica atual do CE de Campos, para o chaveamento de elementos externos de controle de tensão é através do regime de operação em que este equipamento pode estar submetido.

A. Chaveamento na Condição de Regime Permanente:

➤ Chaveamentos na região normal

A região de operação normal do MSRE é com o CE na faixa de $-15/+45$ Mvar. Nesta região, a condição de repouso da lógica de chaveamento realiza a inserção automática de todos os elementos do grupo G1(BC e RT 60 Mvar).

Nesta condição só haverá manobra de elemento se somente alguma unidade do grupo G1 ou qualquer um dos reatores de G2 (RT conectados ao 13,8 kV) estiverem fora da condição de repouso, restabelecendo esta condição.

➤ Chaveamento na região intermediária

O chaveamento de elementos externos será realizado de acordo com as ordens de prioridades para cada evento de chaveamento na região indutiva ou capacitiva de forma a manter o CE com a sua potência reativa mais próxima da região de flutuação de 0 Mvar.

Na região intermediária de operação, CE operando na faixa de $-15/-50$ Mvar ou de $45/80$ Mvar, o MSRE atua inserindo/retirando elementos do grupo G3 (BC do 138 kV), para que o CE volte para a faixa normal de operação. Nesta região os chaveamentos podem ocorrer em intervalos de tempo que variam de um segundo até dez minutos.

➤ Chaveamento na região indutiva – prioridade:

1. Entrada Reator G1;
2. Entrada Reator G2;
3. Retirada Capacitor G3;
4. Retirada de três Capacitores de G2.

➤ Chaveamento na região capacitiva – prioridade:

1. Entrada Capacitor G1;
2. Entrada Capacitor G3;
3. Entrada dos três Capacitores de G2.

B. Chaveamento na Condição de Regime Transitório

A lógica do chaveamento transitório é similar ao chaveamento na condição de regime permanente, entretanto, este observa a corrente do CE entre o limite e as variáveis de limite transitório. Se $|I_{ce}| > |I_{CTC}|$ ou $|I_{ce}| > |I_{LT}|$, a ordem pelo controle do CE é dada imediatamente para manobrar os reatores e capacitores externos conforme lista de prioridade abaixo. O tempo máximo estimado para a realização das manobras de inserção ou retirada de elementos é de aproximadamente 200 ms.

➤ Chaveamento na região indutiva – prioridade:

1. Entrada dos Reatores de G1;
2. Entrada dos Reatores de G2;
3. Retirada dos Capacitores de G1;
4. Retirada dos Capacitores de G3;
5. Retirada dos Capacitores de G2.

➤ Chaveamento na região capacitiva – prioridade:

1. Entrada dos Capacitores de G1;
2. Retirada dos Reatores de G1;
3. Retirada de dois Reatores de G2;
4. Entrada dos Capacitores de G3;
5. Entrada dos Capacitores de G2.

C. Variáveis e Parâmetros

Sendo:

$I_{CE} = I_{SVC}$ → Corrente do CE no lado de 345 kV;

I_{LIMIT} → um dos limites da condição normal;

1) $SSLD$ → desvio do limite de Regime Permanente:

$$SSLD = SSLD(t-1) + \int_{(t-1)}^t (|I_{LIMIT}| - |I_{SVC}|) \cdot dt \quad (4.1)$$

O $SSLD$ começa a integrar quando os elementos não estiverem na condição de repouso e o CE estiver na região normal, se $|I_{SVC}| - |I_{LIMIT}| > (DBWi)$.

2) $ONCD$ → Desvio da condição normal:

$$ONDC = ONDC(t-1) + \int_{t-1}^t (|I_{SVC}| - |I_{LIMIT}|) \cdot dt \quad (4.2)$$

O $ONCD$ começa a integrar quando o CE estiver fora da condição normal, se $(|I_{LIMIT}| \leq |I_{SVC}|)$ e $(|I_{SVC}| - |I_{LIMIT}|) > DBWi$.

3) $TSSL$ → Intervalo de tempo na região normal de regime permanente:

Inicia a contagem quando $(IC_N < I_{SVC} < IL_N)$ e se algum elemento da condição repouso estiver fora desta condição. Decrementa sua contagem quando $(I_{SVC} < IC_N)$ ou $(I_{SVC} > IL_N)$. Esta variável é zerada quando algum elemento de repouso é chaveado.

4) $TONC$ → Intervalo de tempo fora da condição normal:

Inicia a contagem quando $(I_{SVC} < IC_N)$ ou $(I_{SVC} > IL_N)$ e $(|I_{SVC}| - |I_{LIMIT}|) > DBWi$. Esta variável é zerada quando algum elemento externo é chaveado.

Deve ser levado em consideração que os bancos de capacitores externos só estarão disponíveis para manobra de inserção no sistema após 5 minutos de sua retirada.

D. Chaveamento por curva de tempo inverso

Exceto no caso do chaveamento transitório, onde o chaveamento externo é imediato, a decisão de manobra dos elementos externos chaveados mecanicamente dependerá da magnitude do desvio observado pelas variáveis (ONCD ou SSLD), variável de entrada da curva de tempo inverso (Figura 22). Esta curva definirá o tempo que será comparado com (TONC ou TSSL) para a manobra do elemento externo.

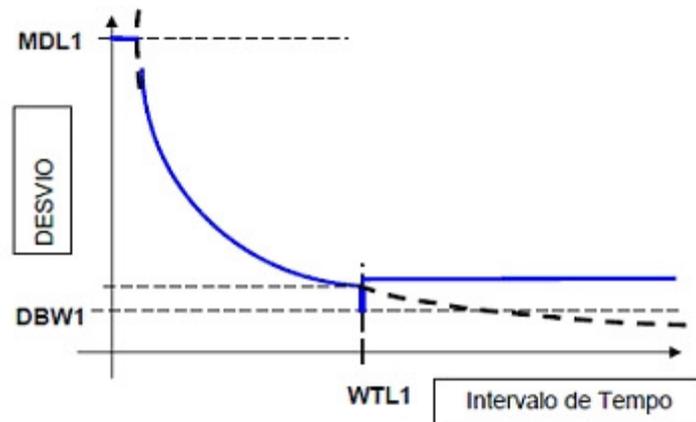


Figura 22 – Curva de Tempo Inverso para Chaveamento dos Elementos Externos²⁶

Três curvas de tempo inverso independentes estão implementadas para a condição transitória, as ações seguem as prioridades estabelecidas da mesma forma que para as condições de regime permanente:

- Condição 1, busca manter a condição normal;
- Condição 2, para grandes desvios, ação seguindo a prioridade estabelecida para região transitória, buscando levar o CE para a região normal;
- Condição 3 aplicada para o restabelecimento das condições de repouso.

Obs: Se o intervalo de tempo de espera atingir seu respectivo limite de tempo, o próximo elemento externo da sequência de prioridade deverá ser chaveado imediatamente.

²⁶ Fonte: BRANDI, E. M., PAIVA, M. A. F., 2001, Nota Técnica DEE.O.003.2001 – Comissionamento do Compensador Estático de Campos -60/+100 Mvar / 345 kV, FURNAS Centrais Elétricas, Julho, p. 9.

Existem três ajustes independentes do tempo de espera limite:

- WTL1 → Condição 1;
- WTL2 → Condição 2;
- WTL3 → Condição 3.

Limite máximo de desvio permitido: se o desvio atingir o seu respectivo limite máximo a ordem de chaveamento é imediatamente enviada pelo controle para execução. Existem três ajustes independentes de desvios limites:

- MDL1 → Desvio limite Condição 1;
- MDL2 → Desvio limite Condição 2;
- MDL3 → Desvio limite Condição 3.

Banda Morta: existem três ajustes independentes de Banda morta:

- DBW1 → Banda Morta Condição 1;
- DBW2 → Banda Morta Condição 2;
- DBW3 → Banda Morta Condição 3.

4.5.4 - Operação do CE

O modo de operação normal do Compensador Estático de Campos é em “AUTOMÁTICO”, regulando a tensão do barramento de 345 kV, com o MSRE e sua respectiva condição de repouso ligados.

Na impossibilidade de operar com o MSRE ligado o COSR-SE, deverá ser informado e coordenar este desligamento, bem como o retorno de todos os elementos externos para o modo de chaveamento manual. Nesta situação o CE deverá ser mantido operando em modo automático (ONS, 2008).

A mudança na tensão da barra de 345 kV da SE Campos será executada sob o controle do COSR-SE mediante o ajuste da tensão de referência do Compensador Estático pelo

operador da subestação. Assim, o COSR-SE determina qual será o valor da tensão de referência do CE, de acordo com as condições do sistema, tais como patamar de carga, condição de carregamento da rede, manutenções programadas ou contingências. Na impossibilidade de operar nesta condição, o COSR-SE deverá ser informado, para que controle a operação em “MANUAL” do Compensador Estático.

Caso a transformação de 345/138 kV da SE Campos esteja fora de operação, os bancos de capacitores BC-01 e BC-02 de 50 Mvar (conectados ao setor de 138 kV) não podem estar habilitados para o MSRE, ou seja, devem permanecer no modo manual de chaveamento. Isto porque, sem a transformação, o barramento de 345 kV, que é a referência do CE, deixa de ser influenciado pelo 138 kV, e assim o chaveamento destes equipamentos não surtiria efeito no CE, podendo vir a prejudicar o controle da tensão do 138 kV.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA

FUZZY EM UM COMPENSADOR ESTÁTICO

5.1 - Introdução

O aumento da necessidade de manobras nos dispositivos de controle de tensão contribui para a diminuição do intervalo de manutenções nestes equipamentos, normalmente determinado em função de um número limite de manobras. Neste contexto, a busca da redução de manobras nestes equipamentos contribui para a redução dos períodos de indisponibilidades, com benefícios técnicos e econômicos para a operação do sistema.

No Capítulo 3, destacou-se a vocação dos sistemas *fuzzy* para representar e utilizar informações incertas, como também sua facilidade para prover um caminho para a manipulação de imprecisões, inerentes ao conhecimento, experiência e intuição de profissionais.

Apoiado na experiência de operação e no controle de tensão de um sistema de potência de grande porte, este capítulo detalhará a proposta de utilização de um sistema especialista *fuzzy* com o objetivo de mitigar as manobras em dispositivos *shunts* discretos e automaticamente controlados por um compensador estático de potência reativa, estrategicamente localizado em um tronco de transmissão de suprimento a uma área do sistema elétrico brasileiro. Para atingir este objetivo, primeiramente serão identificadas as variáveis que influenciam a tomada de decisões para o controle de tensão da barra. Em seguida é buscada uma representação *fuzzy* adequada para estas variáveis e é estabelecido um conjunto de regras de decisão *se-então* que possam traduzir a lógica de controle do equipamento, mas também respeitar limites operativos e de desempenho do sistema nas diferentes condições de operação.

Em uma seção seguinte, os benefícios da aplicação do sistema especialista *fuzzy* proposto são comprovados através da comparação de resultados de simulação, considerando uma real curva de carga do sistema, contendo 336 casos de fluxo de potência, com patamares de carga representados em intervalos de 30 em 30 minutos.

5.2 - O Sistema Especialista *Fuzzy* Proposto

O sistema proposto deverá ser capaz de fornecer os ajustes necessários nos recursos de controle de tensão do CE de Campos (ligar/desligar bancos de capacitores/reatores e alterar sua referência de tensão), de forma a atender uma estratégia adequada, inclusive considerando a natureza discreta da atuação e interação destes dispositivos.

As variáveis que podem influenciar a tomada de decisão (FERREIRA, 2008), sobre a utilização de um ou outro recurso de controle pelo CE de Campos, são: o estado (ligados ou desligados) e a disponibilidade (esgotados ou não) dos dispositivos que este controla, a magnitude da tensão do barramento de 345 kV, que é a sua referência, e o nível de geração de potência reativa.

A Figura 23 destaca os parâmetros que foram escolhidos como variáveis de entrada para o Sistema Especialista *Fuzzy* (SEF). Vale observar que estes parâmetros podem ser facilmente disponibilizados através de um Sistema de Supervisão e Controle.

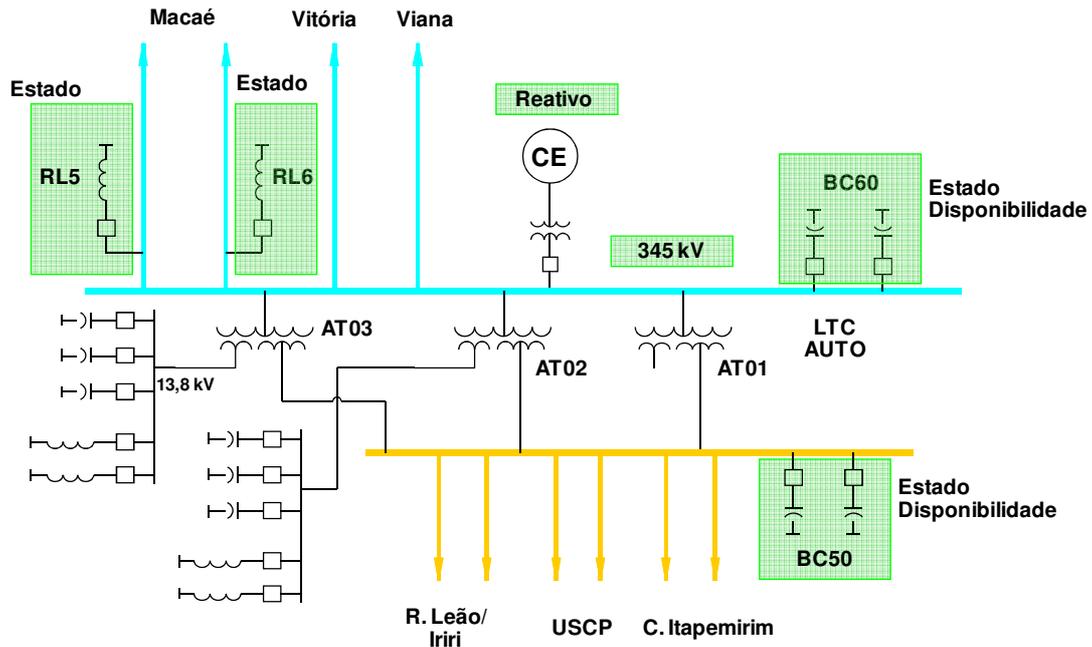


Figura 23 – Variáveis de Entrada para o Sistema de Inferência Fuzzy do CE de Campos

A Figura 24 mostra o SEF projetado para minimizar as ações de manobras nos dispositivos de controle de tensão do CE de Campos.

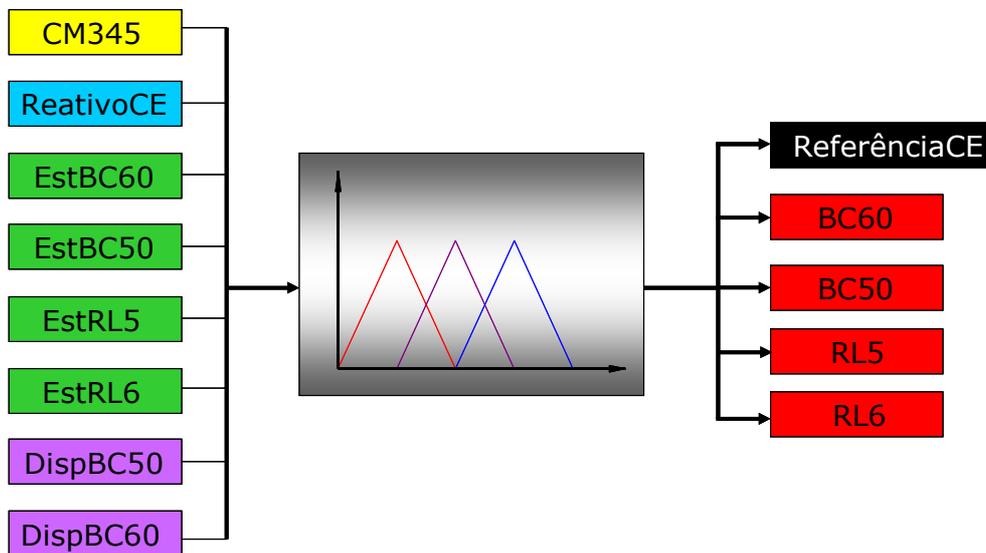


Figura 24 – Sistema Fuzzy de Controle do CE de Campos

A Tabela 8 detalha as variáveis de entrada consideradas no SEF.

Tabela 8 – Descrição das Variáveis de Entrada do Controlador Fuzzy Proposto

Entrada	Descrição
CM_345 kV	Valor da tensão da barra de 345 kV de Campos (em pu) - baixa, pouco baixa, ok, pouco alta ou alta
Est BC-60	Estado dos bancos de capacitores de 60 Mvar da barra de 345 kV de Campos - BC-09 e BC-10 (ligado para pelo menos 1 dos 2 capacitores disponíveis na barra)
Est BC-50	Estado dos bancos de capacitores de 50 Mvar da barra de 138 kV de Campos - BC-01 e BC-02 (ligado para pelo menos 1 dos 2 capacitores disponíveis na barra)
Est RL-05	Estado do banco de reatores de 60 Mvar da LT 345 kV Campos / Macaé C-1 em Campos, RL-05 (ligado ou desligado)
Est RL-06	Estado do banco de reatores de 60 Mvar da LT 345 kV Campos / Macaé C-2 em Campos, RL-06 (ligado ou desligado)
Disp BC-60	Disponibilidade para utilização dos bancos de capacitores de 60 Mvar da barra de 345 kV de Campos (não nula, se houver disponibilidade para ligar pelo menos 1 dos 2 capacitores disponíveis)
Disp BC-50	Disponibilidade para utilização dos bancos de capacitores de 50 Mvar da barra de 138 kV de Campos (não nula, se houver disponibilidade para ligar pelo menos 1 dos 2 capacitores disponíveis)
Reativo do CE	Valor do reativo gerado ou absorvido pelo CE de Campos (muito indutivo, indutivo, zero, capacitivo e muito capacitivo)

O detalhamento das variáveis de saída do SEF proposto podem ser melhor conhecidos através da Figura 25 e da Tabela 9.

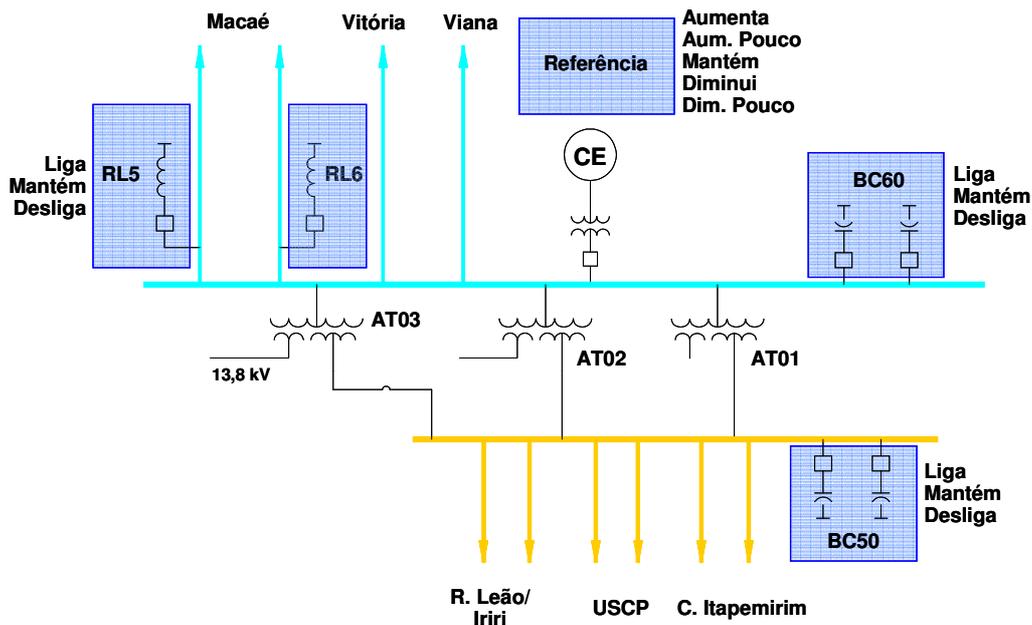


Figura 25 – Variáveis de Saída para o Sistema de Inferência Fuzzy do CE de Campos

Tabela 9 – Descrição das Variáveis de Saída do Controlador Fuzzy Proposto

Saídas	Descrição
BC-60	Manobra dos bancos de capacitores de 60 Mvar da barra de 345 kV de Campos (manter, ligar ou desligar bancos)
BC-50	Manobra dos bancos de capacitores de 50 Mvar da barra de 138 kV de Campos (manter, ligar ou desligar bancos)
RL-05	Manobra do banco de reatores manobráveis de 60 Mvar do terminal de Campos da LT 345 kV Campos - Macaé Merchant C1 (manter, ligar ou desligar reator)
RL-06	Manobra do banco de reatores manobráveis de 60 Mvar do terminal de Campos da LT 345 kV Campos - Macaé Merchant C2 (manter, ligar ou desligar reator)
Referência CE	Ajuste do valor da referência de tensão do compensador estático (diminuir, diminuir pouco, manter, aumentar pouco e aumentar)

As funções de pertinência nas formas mais comumente utilizadas (triangular e trapezoidal) mostraram-se suficientes para modelar as variáveis de entrada e de interesse para o SEF proposto.

Para os valores da tensão de 345 kV de Campos (Figura 26), o grau mínimo de pertinência “Baixa” e o máximo “Alta”, foram estabelecidos de acordo com a

experiência operativa e respeito ao limite de suportabilidade dos equipamentos ligados a este barramento (1,050 pu).

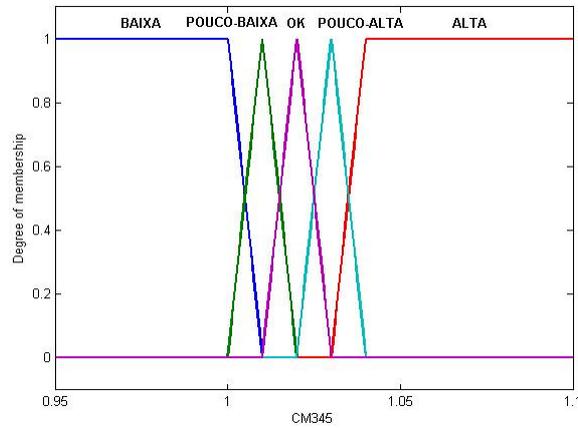


Figura 26 – Função de Pertinência do Valor da Tensão de 345 kV de Campos

O estado dos equipamentos (capacitores ou reatores), “Desligado” ou “Ligado”, assim como suas disponibilidades foram definidos em função da potência reativa fornecida por cada equipamento, observando o sinal positivo, indicando reativo injetado na barra, para os capacitores, e negativo, indicando reativo absorvido da barra, para os reatores, conforme pode ser verificado nas Figura 27 e 28.

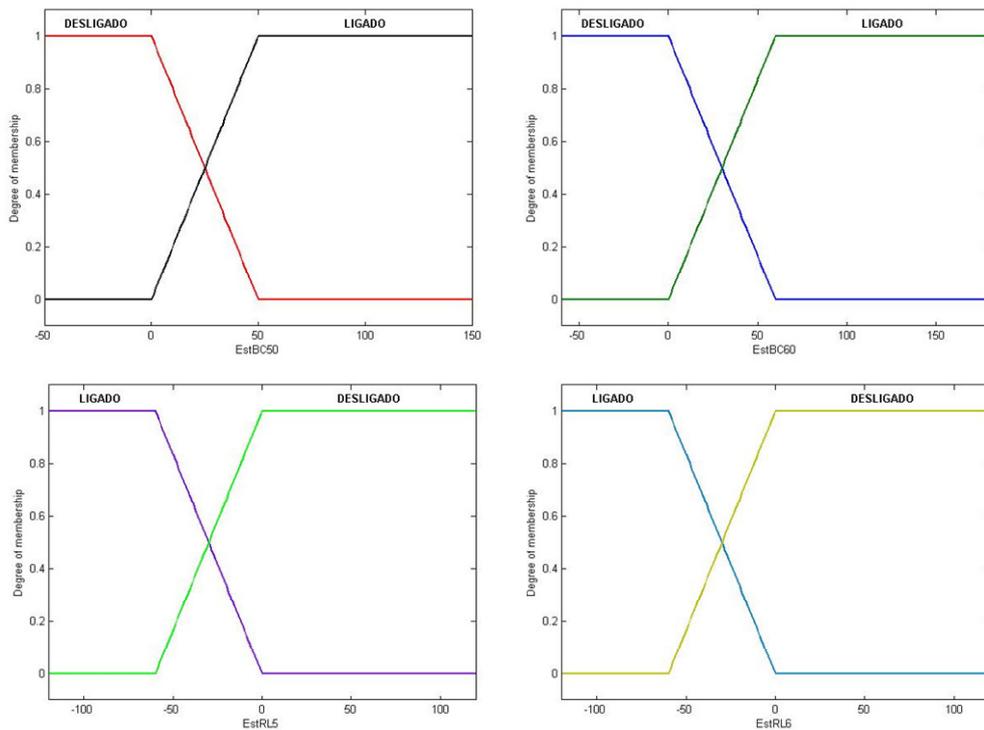


Figura 27 – Funções de Pertinência de Estado dos Equipamentos

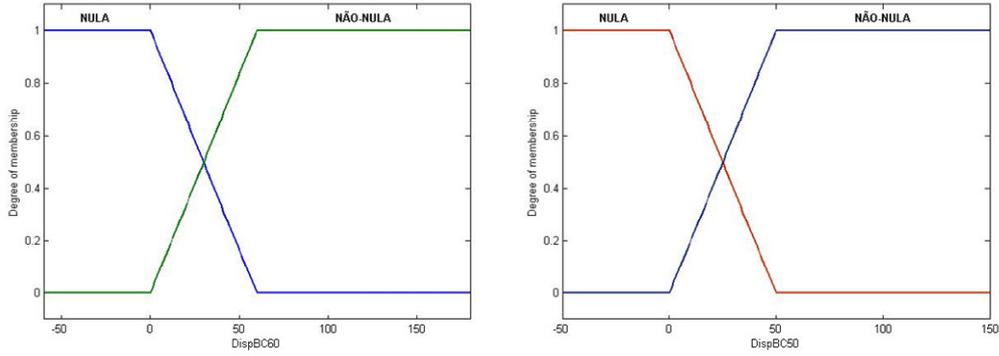


Figura 28 – Funções de Pertinência para Disponibilidade dos Capacitores

Para o valor do reativo gerado ou absorvido pelo compensador estático, foi considerado o limite da faixa de potência reativa do CE de Campos, -60/+100 Mvar, determinando a faixa de -25 a +50 Mvar como valores normais para excursão (Figura 29).

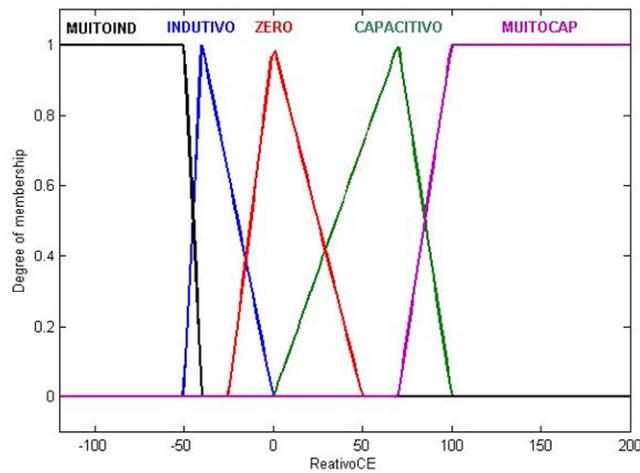


Figura 29 – Funções de Pertinência para a Faixa de Reativo do CE

A Figura 30 apresenta as funções de pertinência de saída do SEF proposto.

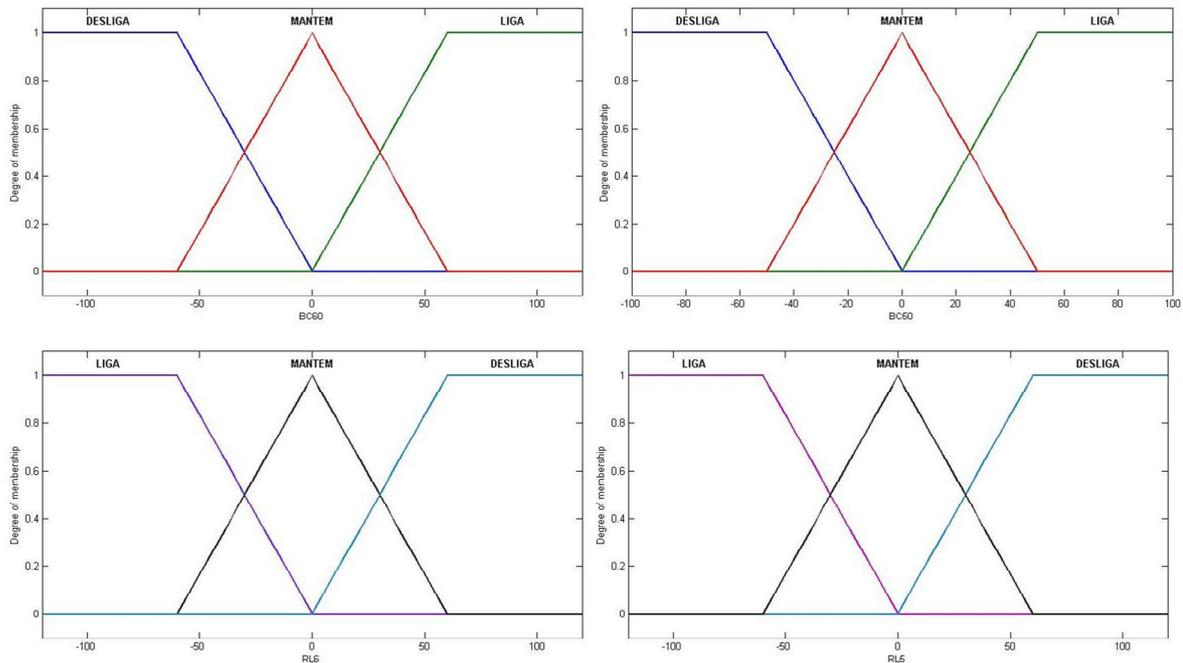


Figura 30 – Funções de Pertinência - Saídas

Vale destacar, na Figura 31, uma função de pertinência de saída importante para a representação de uma ação de controle de tensão e de difícil modelagem em programas de simulação: a inferência para mudança de referência de tensão para um equipamento.

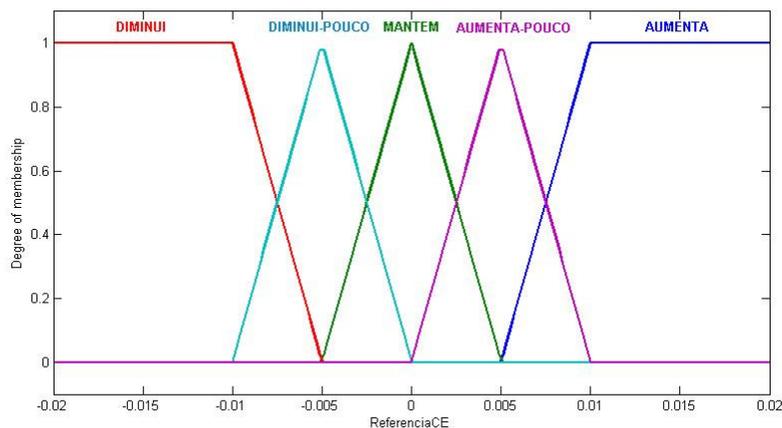


Figura 31 – Função de Pertinência Referência do CE

A base de regras implementada procurou representar da maneira mais próxima da realidade o raciocínio do operador no processo de decisão pela atuação em dispositivos de controle de tensão.

As regras *fuzzy* são baseadas em sentenças do tipo *se-então*, com hierarquia de atuação embutida nos seus antecedentes, conforme:

Se (DispBC60 é NÃO-NULA) ***e*** (EstRL5 é DESLIGADO) ***e*** (CM345 é BAIXA) ***e*** (EstRL6 é DESLIGADO) ***então*** (BC60 é LIGA)

As quatorze regras usadas no processo de inferência Mamdani são apresentadas tabularmente na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10 – Conjunto de Regras do Controlador Fuzzy para o CE de Campos

Regra	Entradas								Manobra				
	CM345	ReativoCE	EstBC50	EstBC60	EstRL5	EstRL6	DispBC50	DispBC60	ReferenciaCE	BC50	BC60	RL5	RL6
1	AT		LIG							DESL			
2	AT		DESL	LIG							DESL		
3	AT		DESL	DESL		DESL							LIG
4	AT		DESL	DESL	DESL	LIG						LIG	
5	AT	~MUITOIND	DESL	DESL	LIG	LIG			DIM				
6	BX				LIG							DESL	
7	BX				DESL	LIG							DESL
8	BX				DESL	DESL		~NULA			LIG		
9	BX				DESL	DESL	~NULA	NULA		LIG			
10	BX	~MUITOCAP			DESL	DESL	NULA	NULA	AUM				
11	PAT	CAP							DIMP				
12	PBX	IND							AUMP				
13	OK	CAP							DIMP				
14	OK	IND							AUMP				

Legenda:

Entradas

DESL	Desligado	CAP	Capacitivo	AT	Alta	PAT	Pouco alta	~	Não
LIG	Ligado	IND	Indutivo	BX	Baixa	PBX	Pouco baixa		

Manobra

DESL	Desligar	AUM	Aumenta	AUMP	Aumenta Pouco
LIG	Ligar	DIM	Diminui	DIMP	Diminui Pouco

Pode ser observado nas regras que antes da decisão para a utilização de um controle *shunt* de tensão, o sistema de inferência também checa previamente a disponibilidade do recurso (disponibilidade “não-nula”, para ligar; estado “ligado” para desligar), conforme apresentado nas regras 2 e 8 abaixo. Esta inferência é particularmente importante para aplicações em tempo real, onde a disponibilidade total dos dispositivos pode estar afetada por manutenções, agilizando a decisão pela utilização de um recurso remoto de controle, no caso da constatação de um esgotamento da potência reativa local.

2. ***Se*** (EstBC60 é LIGADO) ***e*** (EstBC50 é DESLIGADO) ***e*** (CM345 é ALTA) ***então*** (BC60 é DESLIGA)

8. ***Se*** (DispBC60 é NÃO-NULA) ***e*** (EstRL5 é DESLIGADO) ***e*** (CM345 é BAIXA) ***e*** (EstRL6 é DESLIGADO) ***então*** (BC60 é LIGA)

Nesta aplicação não foram consideradas manutenções, somente indisponibilidade por uso, entretanto, os sistemas de gerenciamento de intervenções podem enviar informações de controle para o sistema de supervisão e indicar, na tela de recursos de controle de tensão, que um determinado equipamento passou para o estado impedido, por manutenção ou desligamento forçado, quando a intervenção for colocada como em execução, atendendo assim este requisito²⁷.

Nas regras também está embutida a preocupação em evitar a circulação de potência reativa entre equipamentos, que seria manter capacitores e reatores ligados. Sendo assim, para ligar um reator ou capacitor, é verificado se o seu antagônico está ligado, como é visto nas regras 3 e 9.

3. ***Se*** (EstBC60 é DESLIGADO) ***e*** (EstBC50 é DESLIGADO) ***e*** (CM345 é ALTA) ***e*** (EstRL6 é DESLIGADO) ***então*** (RL6 é LIGA)

²⁷ Atualmente o SSC do ONS não possui este recurso automático, podendo apenas ser realizado manualmente pelos operadores, com o desenvolvimento do novo SSC é pretendido que o sistema de gerenciamento de intervenções forneça dados ao SSC.

9. *Se* (DispBC60 é NULA) *e* (DispBC50 é NÃO-NULA) *e* (EstRL5 é DESLIGADO) *e* (CM345 é BAIXA) *e* (EstRL6 é DESLIGADO) *então* (BC50 é LIGA)

Destacam-se as regras para otimização da potência reativa do CE, utilizando a alteração da tensão de referência deste equipamento. Como exemplo, nota-se nas regras 11 a 14, mostradas abaixo, a preferência por este tipo de atuação quando a tensão de controle é alta e, ao mesmo tempo há fornecimento de reativo pelo CE, corrigindo-se a pequena violação da tensão através da redução da referência de tensão do equipamento (e do seu conseqüente fornecimento de potência reativa), mantendo-se a reserva deste tipo de potência para o sistema.

11. *Se* (ReativoCE é CAPACITIVO) *e* (CM345 é POUCO-ALTA) *então* (ReferenciaCE é DIMINUI-POUCO)

12. *Se* (ReativoCE é INDUTIVO) *e* (CM345 é POUCO-BAIXA) *então* (ReferenciaCE é AUMENTA-POUCO)

13. *Se* (ReativoCE é CAPACITIVO) *e* (CM345 é OK) *então* (ReferenciaCE é DIMINUI-POUCO)

14. *Se* (ReativoCE é INDUTIVO) *e* (CM345 é OK) *então* (ReferenciaCE é AUMENTA-POUCO)

Nas regras 5 e 10 abaixo, verifica-se o uso das pré-condições (antecedentes de regra) de geração do CE, antes da decisão (conseqüente da regra) pela alteração da tensão de referência deste equipamento. Estas pré-condições são importantes para evitar ordens sucessivas (e ineficientes) de alteração da referência de tensão, nas situações de esgotamento ou pouca margem de potência reativa do CE, levando estas referências para valores muito distantes dos normalmente praticados, atrasando, de sobremaneira, a retomada de ações no sentido inverso, quando de uma condição de carga diferente da inicialmente apresentada.

5. *Se* (EstBC60 é DESLIGADO) *e* (EstBC50 é DESLIGADO) *e* (ReativoCE é NÃO-MUITO INDUTIVO) *e* (EstRL5 é LIGADO) *e* (CM345 é ALTA) *e* (EstRL6 é LIGADO) *então* (ReferenciaCE é DIMINUI)

10. *Se* (DispBC60 é NULA) *e* (DispBC50 é NULA) *e* (ReativoCE é NÃO-MUITO CAPACITIVO) *e* (EstRL5 é DESLIGADO) *e* (CM345 é BAIXA) *e* (EstRL6 é DESLIGADO) *então* (ReferenciaCE é AUMENTA)

5.3 - Resultados

A proposta da modificação de um programa de fluxo de potência, de maneira a permitir tanto a obtenção automática da solução do problema em cada patamar de carregamento, de acordo com uma dada curva de carga de uma área de interesse (PASSOS, 2005, FERREIRA, 2008), durante ajustes nos recursos lentos de controle de tensão (PASSOS, 2003) é aqui utilizada de forma a comparar resultados e testar o SEF proposto.

O fluxograma da Figura 32 mostra a estrutura básica do algoritmo de solução da curva de carga, implementado no programa de fluxo de potência, também modificado (FERREIRA, 2008) de forma a interar com um sistema especialista *fuzzy*, que para cada ponto da curva ajusta os controles *fuzzy* (caixa pintada em amarelo), construído com auxílio da *Toolbox* do MATLAB – V. 7.1 (MATHWORKS, 2008, MATHWORKS, 2010) (Apêndice I).

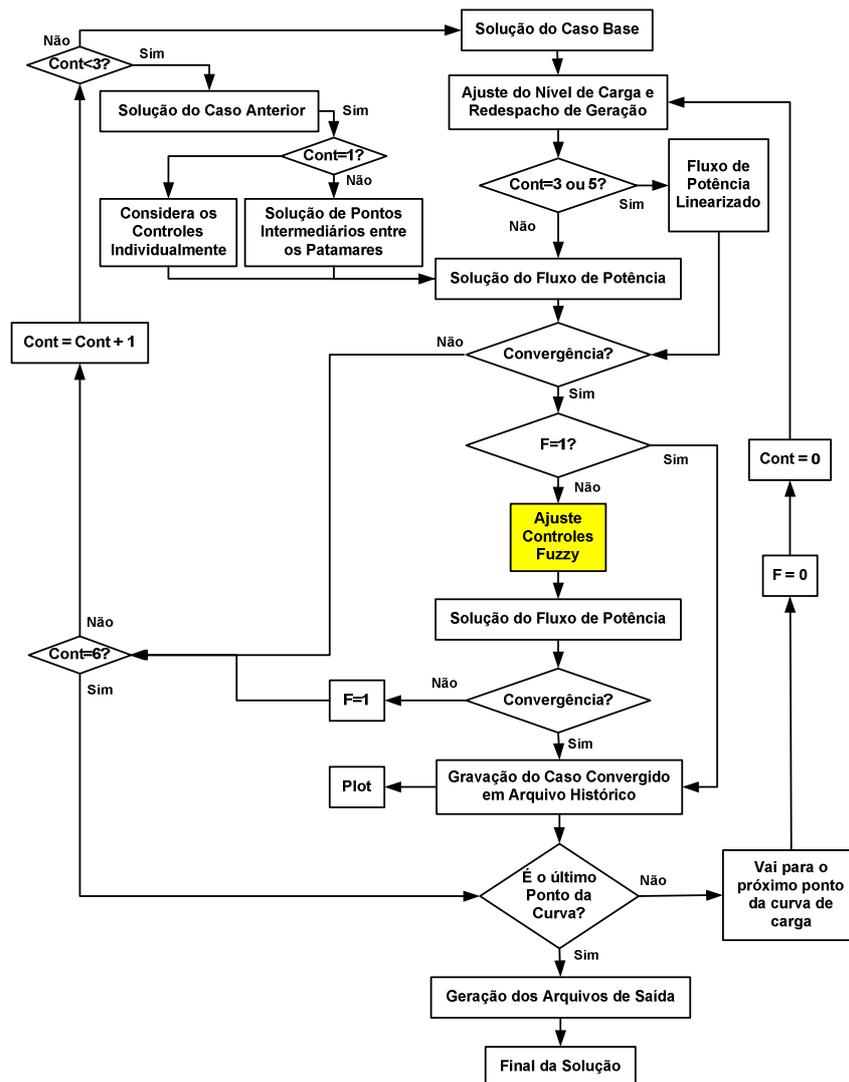


Figura 32 – Algoritmo de Solução da Curva de Carga Incorporando um Sistema Especialista Fuzzy²⁸

A convergência do método de Newton-Raphson é fortemente dependente das condições iniciais fornecidas para o problema. Por este motivo, as seguintes condições iniciais são sucessivamente utilizadas na busca de solução de cada patamar de carregamento (cada patamar será numerado para verificação nos contadores do fluxograma), antes de se considerar a não existência de solução para um dado ponto da curva de carga, que seria a sexta tentativa ($cont=6$):

1. Considera-se a inclusão individual de dispositivos de controle e limites;

²⁸ Fonte: FERREIRA, L. C. A., 2008, *Análise a longo-termo da estabilidade de tensão utilizando métodos estáticos e um sistema especialista fuzzy para representação de ações de controle*. Tese D.Sc., Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil, p. 185.

2. São usados pontos intermediários de solução entre o caso em análise e o caso convergido imediatamente anterior da curva de carga;
3. Consideram-se como condições iniciais de tensão, os valores obtidos do caso anterior convergido da curva de carga. Para os ângulos são usados os valores obtidos na solução do fluxo de potência linear, visando uma melhor condição inicial antes da solução completa do método Newton-Raphson;
4. Restaura-se o caso base fornecido, considerando-o como condição inicial;
5. Restaura-se o caso base fornecido, considerando-o como condição inicial para os valores de tensão e adota-se a solução do fluxo de potência linear como valores iniciais dos ângulos das barras.

Caso nenhuma das opções implementadas para a definição das condições iniciais permita a obtenção de uma solução para um dado carregamento, este caso é automaticamente excluído, sendo registrado em arquivo específico para casos não convergentes, continuando-se com a solução a partir do próximo patamar de carga.

As variáveis de entrada (tensões, além do estado e disponibilidade dos dispositivos *shunts* de controle de tensão) são lidas para cada caso convergido de fluxo de potência, considerando os incrementos previstos na curva de carga e redespachos de geração necessários. O sistema especialista *fuzzy* ajusta (considerando fielmente a natureza discreta dos dispositivos) os recursos de controle de tensão (capacitores, reatores e referência de tensão). O programa de fluxo de potência lê os ajustes propostos e tenta a convergência do caso. Caso não haja convergência, é utilizada uma heurística (PASSOS, 2005) para a convergência dos pontos da curva de carga. Após a aplicação da heurística, o caso é gravado em arquivo histórico e o sistema especialista *fuzzy* busca novos ajustes nos recursos de controle de tensão para o próximo ponto de operação, até que o último incremento da curva de carga seja atingido.

Um caso real (carga média de setembro de 2009) de uso nos estudos de planejamento do SIN é aqui utilizado para teste.

A carga ativa e reativa da área de interesse (área Rio de Janeiro / Espírito Santo, representada resumidamente pela Figura 33) foi considerada como sendo do tipo

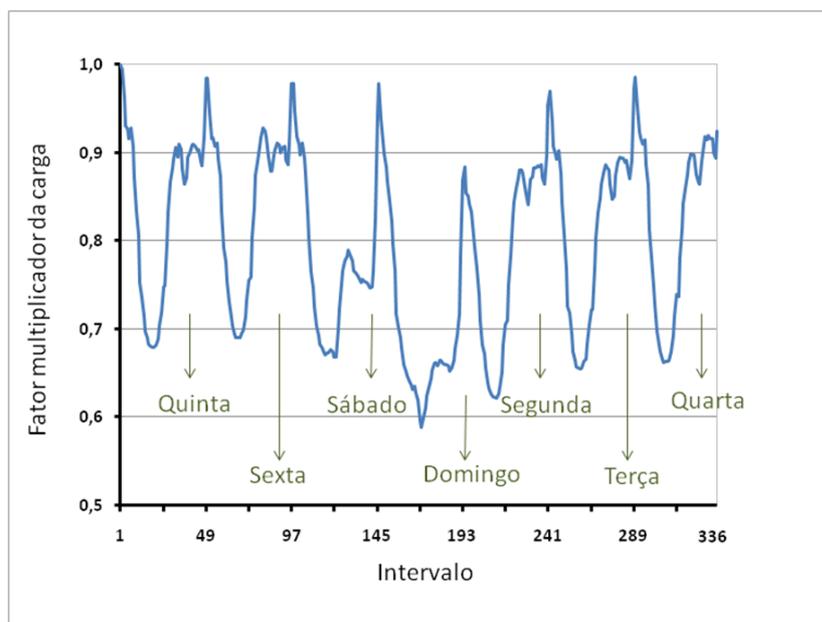


Figura 34 – Curva de Carga Aplicada à Simulação

Esta curva de carga apresenta seu maior valor no ponto 1 com 7.098 MW de carga total, e o mínimo carregamento em 4.172 MW, no ponto de operação 170.

Os limites de tensão, tanto sistêmicos como os específicos (estabelecidos em instruções de operação), considerados para as principais barras do sistema estudado, são os representados nas Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11 – Limites de Tensão Sistêmicos

Nível de Tensão	Faixa de Tensão (pu)	
	Mínima	Máxima
≤ 230 kV	0,950	1,050
345 kV	0,950	1,050
500 kV	0,950	1,100
765 kV	0,960	1,046

Tabela 12 – Limites de Tensão Específicos

Nome da Barra (n° caso)	Faixa de Tensão (pu)	
	Mínima	Máxima
Itutinga 345 kV (138)	1,025	1,050
T. Preto 345 kV (78)	1,000	1,050
São José 138 kV (169)	0,980	1,030
Adrianópolis 345 kV (140)	1,000	1,050
Campos 138 kV	1,014	1,043
Vitória 138 kV	1,007	1,043
Jacarepaguá 138 kV (180)	1,030	1,040
Angra 138 kV	1,007	1,043
C. Paulista 138 kV	1,000	1,050
Barras de carga	0,980	1,050

5.3.1 - Resultados utilizando chaveamento discreto por faixa de tensão

Com auxílio do programa ANAREDE, a curva de carga (Figura 34) é aplicada no sistema (Figura 33) com todos os recursos de controle de tensão do sistema representados e atendendo lógica de chaveamento automático por faixa de tensão (PASSOS, 2003, FERREIRA, 2008), exceto os recursos de controle de tensão localizados em Campos e manobrados pelo CE desta SE, estes, manobrados automática e discretamente, conforme recurso do programa do CEPEL, de maneira a otimizar a potência reativa daquele CE (PASSOS, 2005, CEPEL, 2010).

As Figura 35 a 37 apresentam os resultados da simulação utilizando o ANAREDE para emular as atuações dos operadores nos recursos de controle de tensão, em conjunto com a tentativa de representação mais próxima da atuação nos dispositivos do CE, pelo atual sistema de inferência deste equipamento, representado no campo.

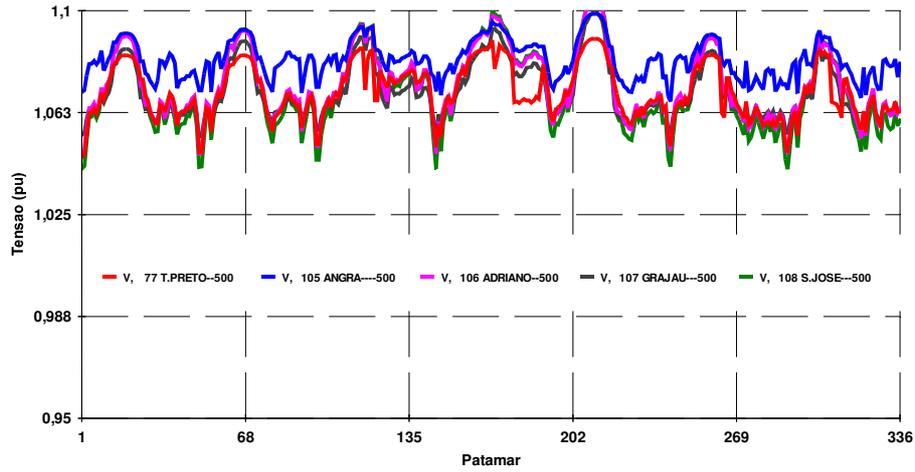


Figura 35 – Perfil de Tensão do 500 kV da Área RJ/ES

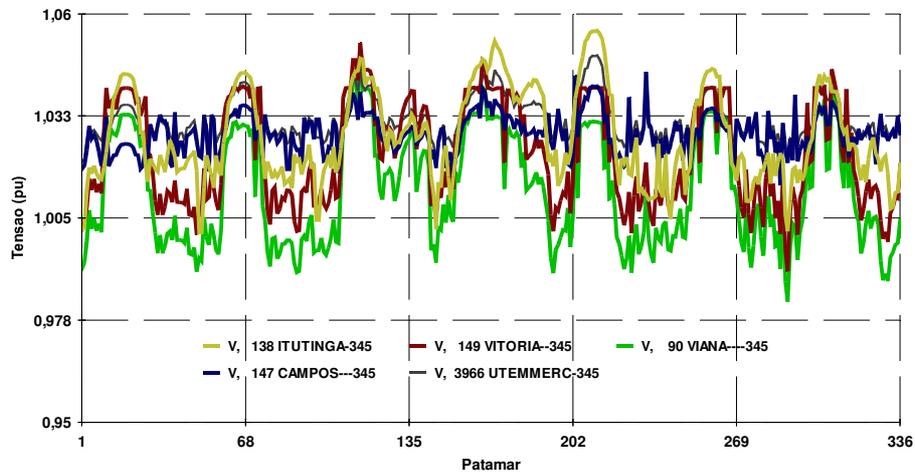


Figura 36 – Perfil de Tensão do Tronco de 345 kV da Área RJ/ES

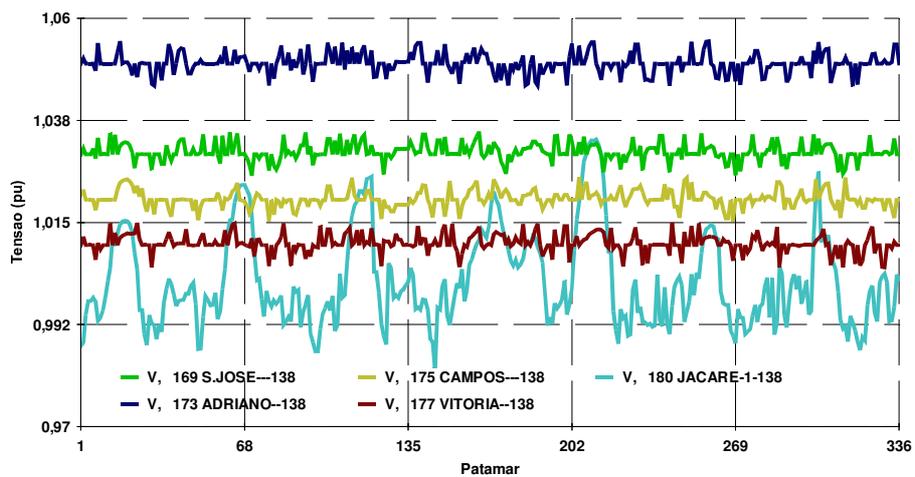


Figura 37 – Perfil de Tensão das Barras de 138 kV da Área RJ/ES

A Figura 38 mostra a evolução do chaveamento dos principais reatores para o controle de tensão da Área Rio de Janeiro/Espírito Santo.

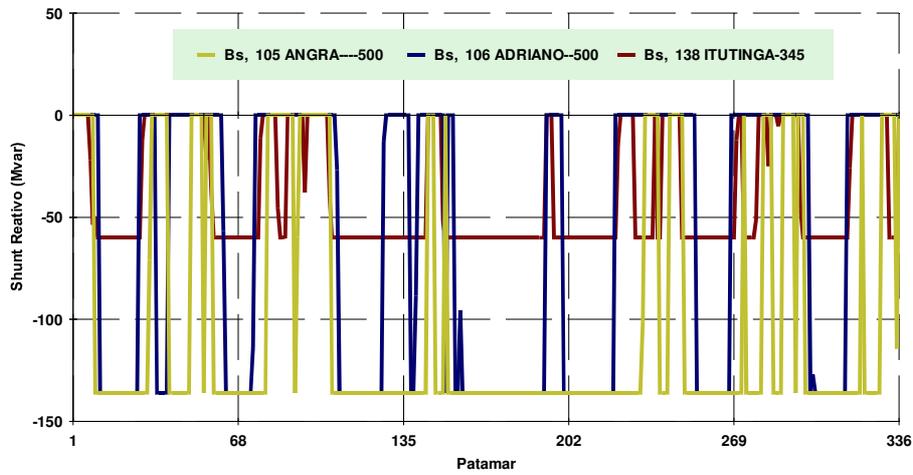


Figura 38 – Chaveamento dos Reatores da Área RJ/ES

Na Figura 39 é apresentada a evolução do chaveamento dos bancos de capacitores e reatores controlados pelo CE de Campos.

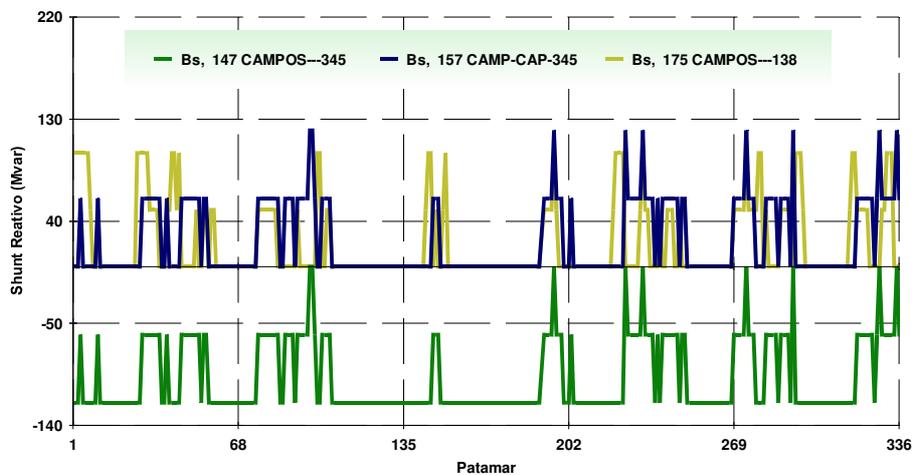


Figura 39 – Chaveamento dos Shunts Controlados pelo CE de Campos

Neste Caso Base, considerando o chaveamento de grandes blocos de compensação *shunt* e a atuação em *LTC* sistêmicos, foi verificado que o valor da tensão nos diversos barramentos da área respeitou os limites, e ainda foi verificada a taxa de 99,4% de convergência, *i.e.* apenas dois casos de fluxo de potência dos 336 patamares da curva de carga não convergiram.

Na Tabela 13 a seguir, é apresentado o número total de manobras (ligar ou desligar) dos equipamentos de controle, reator de 60 Mvar e bancos de capacitores de 50 e 60 Mvar, que são controlados pelo CE de Campos, verificados durante a simulação da curva de carga.

Tabela 13 – Número de Manobras por Equipamento de Campos

Equipamento	Nº total de manobras
BC 50 Mvar	80
BC 60 Mvar	61
RT 60 Mvar	61

Desta maneira, estes valores servirão de comparação para o caso simulado com a implementação do controlador *fuzzy* para o CE de Campos, onde é buscada a redução do número total de manobras dos equipamentos chaveados por este equipamento.

5.3.2 - Resultados utilizando um Sistema Especialista Fuzzy

Excetuando-se a dispensa do ANAREDE de atuação nos dispositivos de controle do CE de Campos – aqui atuados pelo SEF proposto – todas as demais considerações citadas na simulação anterior são válidas e serão utilizadas nesta seção para comparação dos resultados.

A Figura 40 mostra as variáveis de saída do sistema especialista *fuzzy*, responsáveis pela atuação nos dispositivos de controle externos ao CE de Campos. É importante observar a manutenção da natureza discreta da atuação nestes dispositivos a cada atuação. Já a Figura 41 apresenta a atuação do sistema *fuzzy* na tensão de referência do CE.

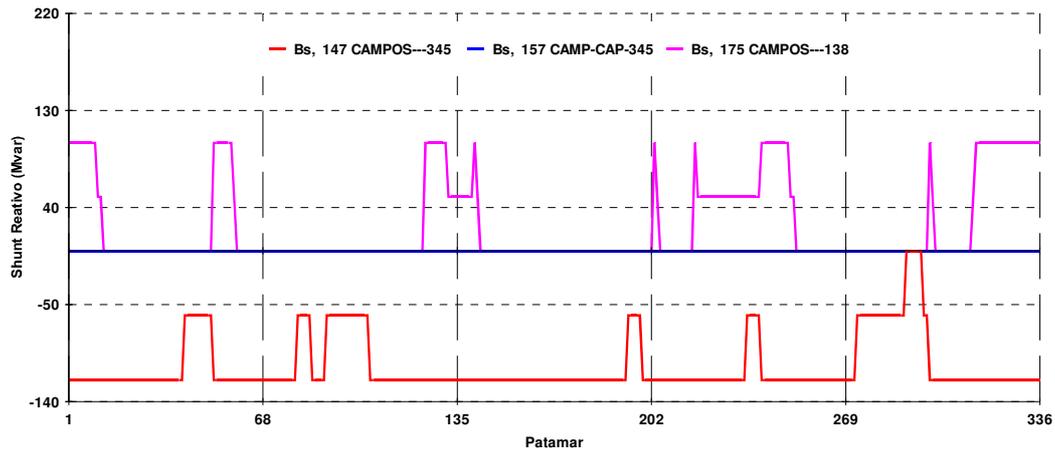


Figura 40 – Atuação nos Elementos Externos do CE de Campos

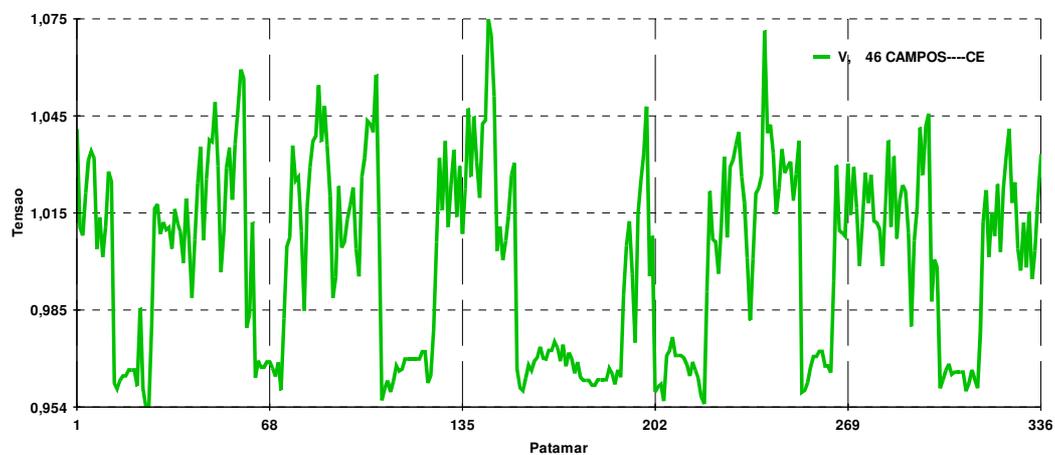


Figura 41 – Atuação na Tensão de Referência do CE de Campos

Mesmo tendo a atuação discreta e muitas vezes simultânea nos recursos de controle de tensão, o grande impacto destas manobras e das significativas variações de carga entre os patamares da curva de carga simulada, houve convergência de 99,7% dos 336 patamares de carga, o que significa que apenas um caso não convergiu, foi necessária a utilização da heurística para a convergência como recurso em oito patamares (51, 124, 141, 203, 217, 240, 298 e 314).

O resultado da atuação do sistema especialista *fuzzy* proposto é mostrado (Figura 42) através da monitoração do valor da tensão de 345 e 138 kV da SE Campos. E ainda na Figura 43, mostrando o acompanhamento do reativo do CE de Campos à curva de carga, sem esgotar sua capacidade.

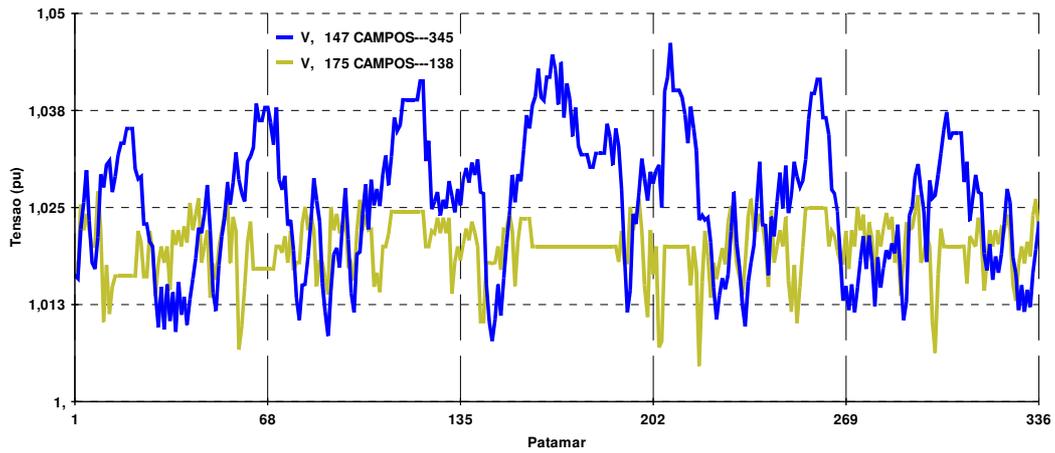


Figura 42 – Perfil do Valor das Tensões da SE Campos

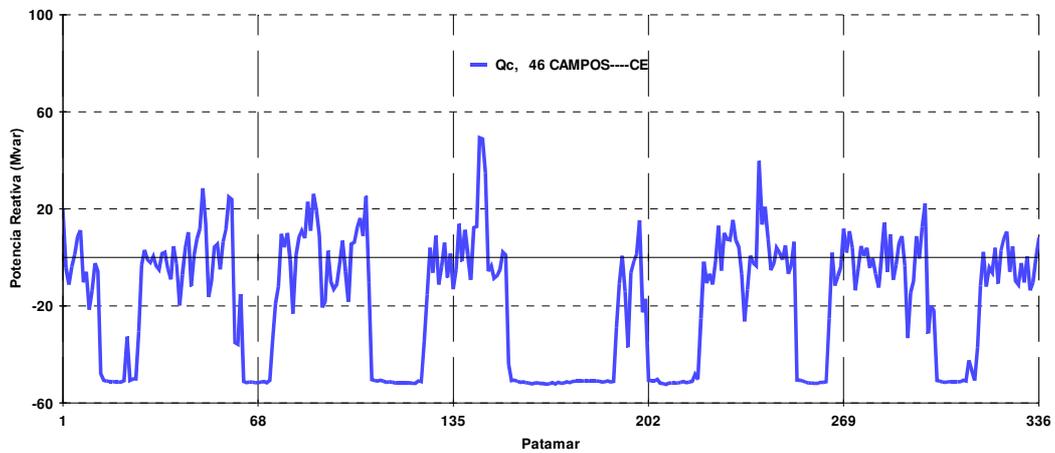


Figura 43 – Curva do Reativo do CE de Campos

Na comparação dos perfis das tensões de 345 kV (Figura 44) e 138 kV (Figura 45) da SE Campos, não são identificadas violações aos limites específicos destas barras. Vale lembrar que a barra de 345 kV é a referência para o CE de Campos, e que este a controla de acordo com a referência determinada pelo operador, já a barra de 138 kV tem seu controle efetuado por um *LTC*, em ambos os casos, assim como na operação real.

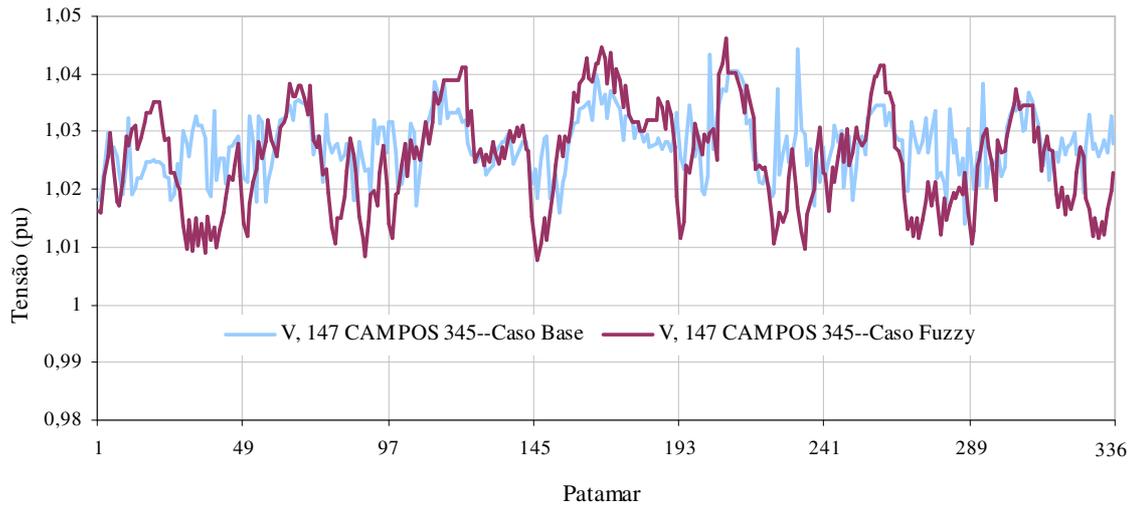


Figura 44 – Tensão de 345 kV da SE Campos – Caso Base x Caso Fuzzy

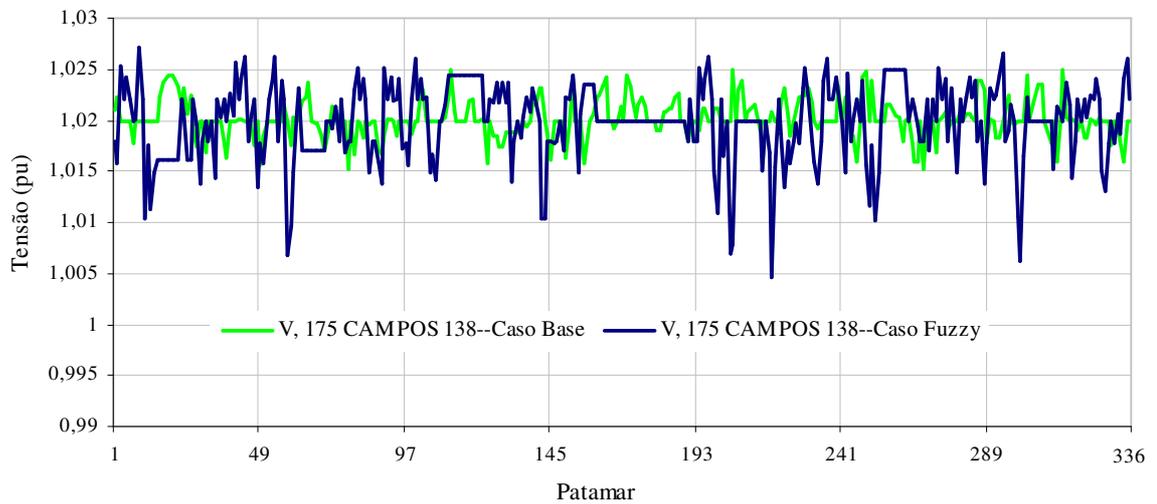


Figura 45 – Tensão de 138 kV da SE Campos – Caso Base x Caso Fuzzy

Na Figura 46 verifica-se a resposta à rede do compensador estático de Campos em ambos os casos dentro dos limites da faixa de potência reativa (-60/+100 Mvar), sem apresentar esgotamento deste controle.

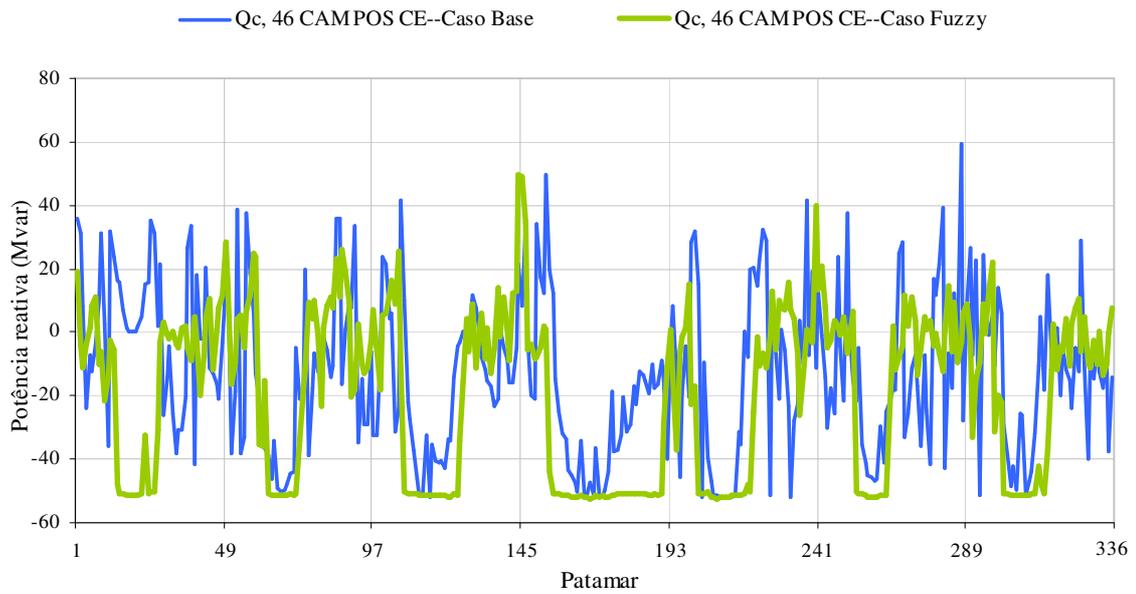


Figura 46 – Curva do Reativo do CE de Campos – Caso Base x Caso Fuzzy

A seguir serão comparadas as evoluções do chaveamento dos equipamentos externos de controle de tensão do CE de Campos, que são para o controlador *fuzzy* suas saídas (Figura 47 a 50).

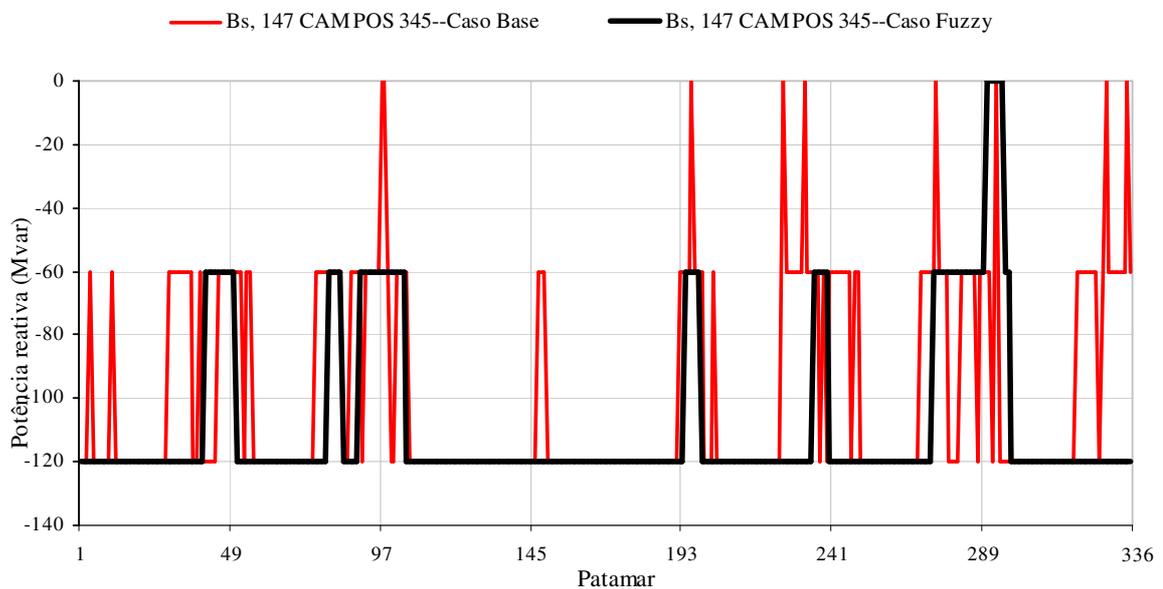


Figura 47 – Chaveamento dos Reatores de 345 kV-60 Mvar RL-5 e RL-6 – Caso Base x Caso Fuzzy

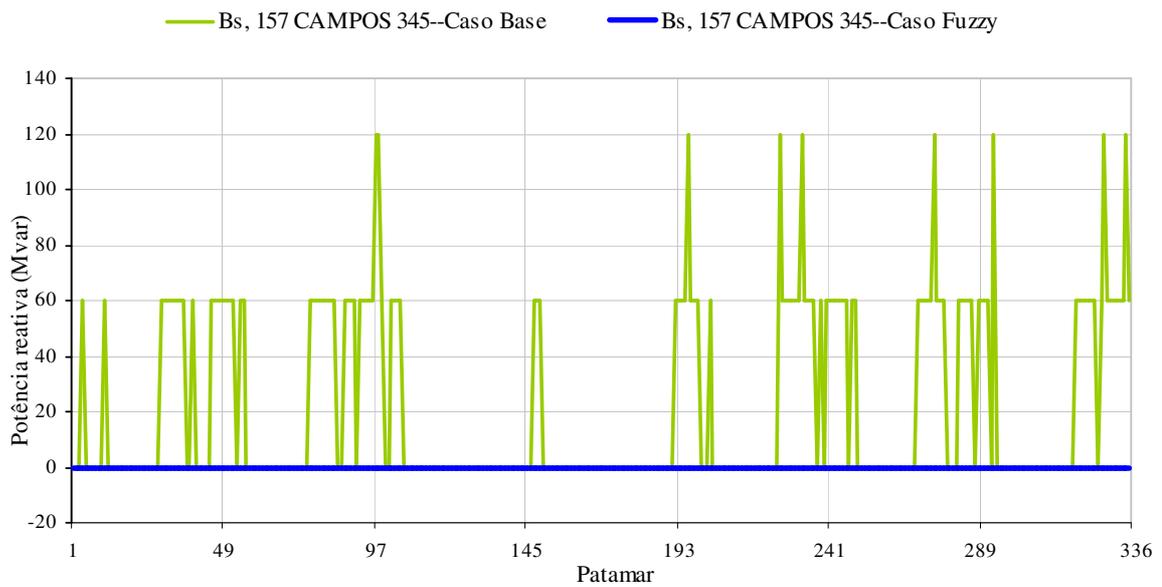


Figura 48 – Chaveamento dos Bancos de Capacitores de 345 kV-60 Mvar BC-09 e BC-10 –
Caso Base x Caso Fuzzy

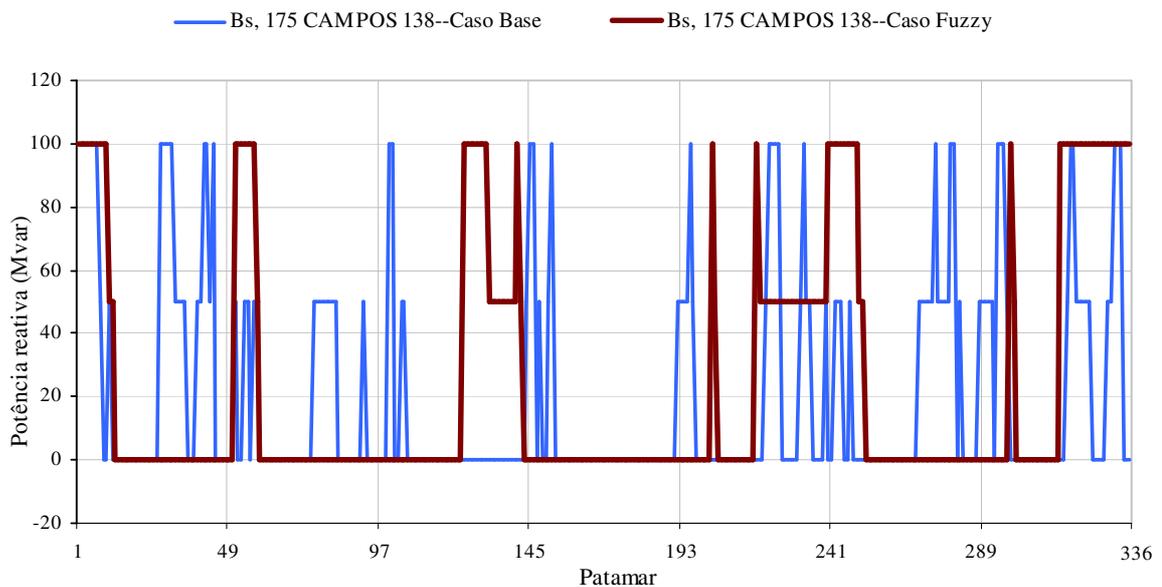


Figura 49 – Chaveamento dos Bancos de Capacitores de 138 kV-50 Mvar BC-01 e BC-02 –
Caso Base x Caso Fuzzy

O objetivo central deste trabalho é reduzir o número de manobras nos equipamentos de controle de tensão chaveados, mantendo o perfil de tensão das barras adequado aos Procedimentos de Rede, isto através de um sistema especialista *fuzzy*, capaz de controlar o compensador estático de Campos e seus equipamentos.

Comparativamente observa-se queda acentuada no número de manobras de cada equipamento, como pode ser visto pela Tabela 14, considerando a atuação do controlador *fuzzy*.

Tabela 14 – Comparativo do Número de Manobras entre os Casos Simulados

Equipamento	N° total de manobras		Redução Percentual (%)
	Caso Base	Caso <i>Fuzzy</i>	
BC 50 Mvar	80	28	65
BC 60 Mvar	61	0	100
RT 60 Mvar	61	14	77

Para os bancos de capacitores de 50 Mvar e os reatores de 60 Mvar, verificou-se redução da ordem de 70%. Já para os bancos de capacitores de 60 Mvar foi possível zerar as manobras ao longo da curva de carga, isto foi possível devido à inclusão no conjunto de regras pela preferência de manobrar os bancos de capacitores de 50 Mvar.

Outro aspecto que contribuiu para esta redução é a priorização em variar a referência do CE de Campos, excursionando mais pela sua faixa reativa em demérito a manobras nos equipamentos *shunt*.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento da complexidade do sistema, tanto pela sofisticação dos dispositivos de controle ligados diretamente à carga, pelas incertezas de sua modelagem, ou mesmo pela dificuldade de previsão do seu montante, através do desconto da geração “embutida” nesta modelagem, em razão de pequenos produtores, co-geração, geração distribuída, estas últimas, muitas com características sazonais, vem cada vez mais tornando mais complexa a operação do sistema, particularmente o controle de tensão em regime permanente. Como uma das consequências do aumento das incertezas deste tipo de controle, constata-se uma maior necessidade de manobras em equipamentos de controle de tensão.

Ao mesmo tempo, junto com a reestruturação do setor elétrico brasileiro, surgiu a necessidade, por parte dos agentes, do cumprimento de requisitos mínimos de desempenho dos equipamentos da rede de operação, evitando penalizações por consequência de restrições de capacidade ou de suas indisponibilidades.

Sabendo-se que as indisponibilidades para atender manutenções possuem forte relação com o número de manobras sofridas pelos equipamentos, os agentes proprietários destes equipamentos vêm envidando esforços no sentido de minimizar estes chaveamentos com o objetivo de garantir o seu bom desempenho e evitar descontos na receita permitida.

Apoiado na experiência de operação e no controle de tensão de um sistema de potência de grande porte, este trabalho propôs, mantendo o bom desempenho deste sistema, a utilização de um Sistema Especialista *Fuzzy* (SEF) com o objetivo de mitigar as manobras em dispositivos *shunts* automaticamente controlados por um compensador

estático de potência reativa, estrategicamente localizado em um tronco de transmissão de suprimento a uma área do sistema elétrico brasileiro.

Os benefícios da aplicação do sistema proposto foram comprovados através da comparação de resultados de simulação, considerando uma real curva de carga do sistema, contendo 336 casos de fluxo de potência, com patamares de carga representados em intervalos de 30 em 30 minutos.

Os resultados mostraram que através do SEF foi possível obter uma redução média de cerca de 80 % da quantidade de manobras dos equipamentos de controle de tensão chaveados pelo CE, o que refletiria em grande redução econômica.

Apesar dos resultados terem sido obtidos através da integração do SEF proposto em um programa de fluxo de potência, acredita-se no seu potencial para aplicações em campo e na operação em tempo real, além de auxílio a treinamento de operadores de sistema elétrico.

Como proposta para estudos futuros, sugere-se o desenvolvimento de um processo automático para elaboração da base de conhecimento do sistema especialista, já que a correta estrutura da base de regras é fundamental para a efetividade do SEF. Incluindo informações das ferramentas de análise do desempenho do sistema na formação das regras para a atuação nos dispositivos de controle, bem como a monitoração de parâmetros específicos dos equipamentos a serem poupados, prevendo o aumento da probabilidade de potenciais defeitos ou necessidades periódicas de manutenção.

APÊNDICE I

CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY NO PROGRAMA MATLAB

I.1 - Código MATLAB (Toolbox *Fuzzy*)

```
[System]
Name='CE_CM24'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=8
NumOutputs=5
NumRules=14
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='EstBC60'
Range=[-60 180]
NumMFs=2
MF1='DESLIGADO': 'trapmf', [-60 -60 0 60]
MF2='LIGADO': 'trapmf', [0 60 180 180]

[Input2]
Name='EstBC50'
Range=[-50 150]
NumMFs=2
MF1='DESLIGADO': 'trapmf', [-50 -50 0 50]
MF2='LIGADO': 'trapmf', [0 50 150 150]

[Input3]
Name='DispBC60'
Range=[-60 180]
NumMFs=2
MF1='NULA': 'trapmf', [-60 -60 0 60]
MF2='NÃO-NULA': 'trapmf', [0 60 180 180]
```

```

[Input4]
Name='DispBC50'
Range=[-50 150]
NumMFs=2
MF1='NULA':'trapmf',[-50 -50 0 50]
MF2='NÃO-NULA':'trapmf',[0 50 150 150]

[Input5]
Name='ReativoCE'
Range=[-120 200]
NumMFs=5
MF1='INDUTIVO':'trimf',[-50 -40 0]
MF2='CAPACITIVO':'trimf',[0 70 100]
MF3='ZERO':'trimf',[-25 0 50]
MF4='MUITOIND':'trapmf',[-130 -120 -50 -40]
MF5='MUITOCAP':'trapmf',[70 100 200 220]

[Input6]
Name='EstRL5'
Range=[-120 120]
NumMFs=2
MF1='LIGADO':'trapmf',[-120 -120 -60 0]
MF2='DESLIGADO':'trapmf',[-60 0 120 120]

[Input7]
Name='CM345'
Range=[0.95 1.1]
NumMFs=5
MF1='BAIXA':'trapmf',[0.9304 0.95 1 1.01]
MF2='POUCO-BAIXA':'trimf',[1 1.01 1.02]
MF3='ALTA':'trapmf',[1.03 1.04 1.1 1.15]
MF4='POUCO-ALTA':'trimf',[1.02 1.03 1.04]
MF5='OK':'trimf',[1.01 1.02 1.03]

[Input8]
Name='EstRL6'
Range=[-120 120]
NumMFs=2
MF1='LIGADO':'trapmf',[-120 -120 -60 0]
MF2='DESLIGADO':'trapmf',[-60 0 120 120]

[Output1]
Name='BC60'
Range=[-120 120]
NumMFs=3
MF1='DESLIGA':'trapmf',[-130 -120 -60 0]
MF2='LIGA':'trapmf',[0 60 120 130]
MF3='MANTEM':'trimf',[-60 0 60]

[Output2]
Name='BC50'
Range=[-100 100]
NumMFs=3
MF1='DESLIGA':'trapmf',[-110 -100 -50 0]
MF2='LIGA':'trapmf',[0 50 100 110]
MF3='MANTEM':'trimf',[-50 0 50]

[Output3]
Name='RL5'
Range=[-120 120]
NumMFs=3

```

```
MF1='LIGA': 'trapmf', [-130 -120 -60 0]
MF2='DESLIGA': 'trapmf', [0 60 120 130]
MF3='MANTEM': 'trimf', [-60 0 60]
```

[Output4]

```
Name='ReferenciaCE'
Range=[-0.02 0.02]
NumMFs=5
MF1='AUMENTA': 'trapmf', [0.005 0.01 0.02 0.03]
MF2='MANTEM': 'trimf', [-0.005 0 0.005]
MF3='DIMINUI': 'trapmf', [-0.03 -0.02 -0.01 -0.005]
MF4='DIMINUI-POUCO': 'trimf', [-0.01 -0.005 0]
MF5='AUMENTA-POUCO': 'trimf', [0 0.005 0.01]
```

[Output5]

```
Name='RL6'
Range=[-120 120]
NumMFs=3
MF1='LIGA': 'trapmf', [-130 -120 -60 0]
MF2='MANTEM': 'trimf', [-60 0 60]
MF3='DESLIGA': 'trapmf', [0 60 120 130]
```

[Rules]

```
0 2 0 0 0 0 3 0, 3 1 3 2 2 (1) : 1
2 1 0 0 0 0 3 0, 1 3 3 2 2 (1) : 1
1 1 0 0 0 0 3 2, 3 3 3 2 1 (1) : 1
1 1 0 0 0 2 3 1, 3 3 1 2 2 (1) : 1
1 1 0 0 -4 1 3 1, 3 3 3 3 2 (1) : 1
0 0 0 0 0 1 1 0, 3 3 2 2 2 (1) : 1
0 0 0 0 0 2 1 1, 3 3 3 2 3 (1) : 1
0 0 2 0 0 2 1 2, 2 3 3 2 2 (1) : 1
0 0 1 2 0 2 1 2, 3 2 3 2 2 (1) : 1
0 0 1 1 -5 2 1 2, 3 3 3 1 2 (1) : 1
0 0 0 0 2 0 4 0, 3 3 3 4 2 (1) : 1
0 0 0 0 1 0 2 0, 3 3 3 5 2 (1) : 1
0 0 0 0 2 0 5 0, 3 3 3 4 2 (1) : 1
0 0 0 0 1 0 5 0, 3 3 3 5 2 (1) : 1
```

I.2 - Sentenças da Base de Regras

1. *Se* (EstBC50 é LIGADO) *e* (CM345 é ALTA) *então* (BC50 é DESLIGA)
2. *Se* (EstBC60 é LIGADO) *e* (EstBC50 é DESLIGADO) *e* (CM345 é ALTA) *então* (BC60 é DESLIGA)
3. *Se* (EstBC60 é DESLIGADO) *e* (EstBC50 é DESLIGADO) *e* (CM345 é ALTA) *e* (EstRL6 é DESLIGADO) *então* (RL6 é LIGA)
4. *Se* (EstBC60 é DESLIGADO) *e* (EstBC50 é DESLIGADO) *e* (EstRL5 é DESLIGADO) *e* (CM345 é ALTA) *e* (EstRL6 é LIGADO) *então* (RL5 é LIGA)
5. *Se* (EstBC60 é DESLIGADO) *e* (EstBC50 é DESLIGADO) *e* (ReativoCE é NÃO-MUITO INDUTIVO) *e* (EstRL5 é LIGADO) *e* (CM345 é ALTA) *e* (EstRL6 é LIGADO) *então* (ReferenciaCE é DIMINUI)
6. *Se* (EstRL5 é LIGADO) *e* (CM345 é BAIXA) *então* (RL5 é DESLIGA)
7. *Se* (EstRL5 é DESLIGADO) *e* (CM345 é BAIXA) *e* (EstRL6 é LIGADO) *então* (RL6 é DESLIGA)
8. *Se* (DispBC60 é NÃO-NULA) *e* (EstRL5 é DESLIGADO) *e* (CM345 é BAIXA) *e* (EstRL6 é DESLIGADO) *então* (BC60 é LIGA)
9. *Se* (DispBC60 é NULA) *e* (DispBC50 é NÃO-NULA) *e* (EstRL5 é DESLIGADO) *e* (CM345 é BAIXA) *e* (EstRL6 é DESLIGADO) *então* (BC50 é LIGA)
10. *Se* (DispBC60 é NULA) *e* (DispBC50 é NULA) *e* (ReativoCE é NÃO-MUITO CAPACITIVO) *e* (EstRL5 é DESLIGADO) *e* (CM345 é BAIXA) *e* (EstRL6 é DESLIGADO) *então* (ReferenciaCE é AUMENTA)

11. *Se* (ReativoCE é CAPACITIVO) *e* (CM345 é POUCO-ALTA) *então* (ReferenciaCE é DIMINUI-POUCO)
12. *Se* (ReativoCE é INDUTIVO) *e* (CM345 é POUCO-BAIXA) *então* (ReferenciaCE é AUMENTA-POUCO)
13. *Se* (ReativoCE é CAPACITIVO) *e* (CM345 é OK) *então* (ReferenciaCE é DIMINUI-POUCO)
14. *Se* (ReativoCE é INDUTIVO) *e* (CM345 é OK) *então* (ReferenciaCE é AUMENTA-POUCO)

ANEXO A

MODELO DO COMPENSADOR ESTÁTICO NO ANAREDE

Este anexo é parte de um estudo completo (PASSOS, 2005) sobre o assunto.

A.1 - Modelo do CE no ANAREDE

Do ponto de vista operacional, o Compensador Estático pode ser visto como uma reatância *shunt* variável, gerando ou absorvendo potência reativa, que é ajustada automaticamente em resposta à variação das condições de operação do sistema.

As curvas características, V/I e V/Q , do CE em estado permanente, são mostradas nas Figura 50 e 2. A faixa de controle linear é determinada pela susceptância máxima do indutor e pela susceptância total devido aos bancos de capacitores em serviço e à capacitância de filtragem.

Da faixa linear na Figura 50 tem-se que:

$$V = V_0 + r.Q \quad (\text{A.1})$$

$$r = \frac{V^{\min} - V^{\max}}{Q^{\max} - Q^{\min}} \quad (\text{A.2})$$

$$V_0 = \frac{V^{\max}.Q^{\max} - V^{\min}.Q^{\min}}{Q^{\max} - Q^{\min}} \quad (\text{A.3})$$

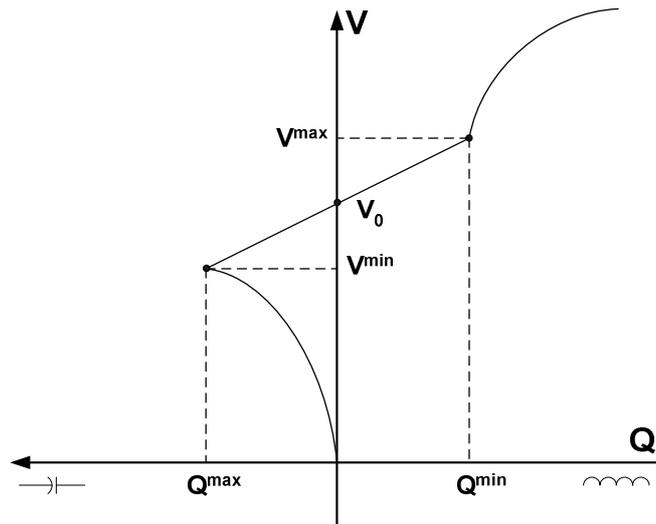


Figura 50 – Característica Tensão versus Potência Reativa do CE²⁹

Da faixa linear na Figura 51 tem-se que:

$$V = V_0 + r.I \quad (\text{A.4})$$

$$r = \frac{V^{\min} - V^{\max}}{I_L^{\max} - I_C^{\max}} \quad (\text{A.5})$$

$$V_0 = \frac{V^{\max} \cdot I_L^{\max} - V^{\min} \cdot I_C^{\max}}{I_L^{\max} - I_C^{\max}} \quad (\text{A.6})$$

²⁹ FONTE: PASSOS FILHO, J. A., 2005, *Representação e Avaliação do Desempenho de Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência*, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, p. 204.

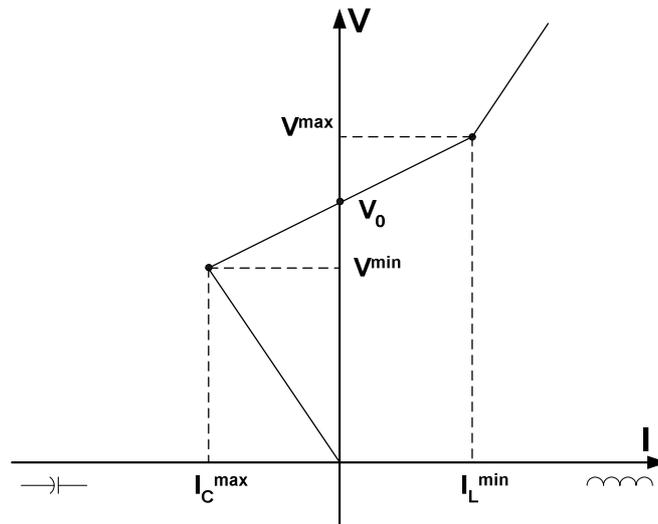


Figura 51 – Característica Tensão versus Corrente do CE³⁰

Para a representação do CE no problema de fluxo de potência, considera-se a potência reativa injetada na barra do CE como variável de estado adicional. Para tornar o sistema de equações possível e determinado, uma equação de controle representando o comportamento deste dispositivo é adicionada ao sistema de equações. Esta equação é modificada durante o processo iterativo, sendo função do ponto de operação do equipamento bem como da modelagem de controle adotada (controle de potência reativa ou corrente injetada).

Seja um CE localizado na barra k , controlando o módulo da tensão na barra m . A estrutura genérica do controle de tensão é a mostrada em (A.7).

³⁰ FONTE: PASSOS FILHO, J. A., 2005, *Representação e Avaliação do Desempenho de Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência*, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, p. 203.

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q'_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \vdots \\ \Delta y \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots \\ \dots & H_{kk} & N_{kk} & \dots & H_{km} & N_{km} & \dots & 0 & \dots \\ \dots & J_{kk} & L_{kk} & \dots & J_{km} & L_{km} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x} & \dots \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & H_{mk} & N_{mk} & \dots & H_{mm} & N_{mm} & \dots & 0 & \dots \\ \dots & j_{mk} & L_{mk} & \dots & J_{mm} & L_{mm} & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & 0 & \frac{\partial y}{\partial V_k} & \dots & 0 & \frac{\partial y}{\partial V_m} & \dots & \frac{\partial y}{\partial x} & \dots \\ \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_m \\ \vdots \\ \Delta x \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

A nova variável de estado neste caso é então:

$$\Delta x = \Delta Q_{G_k} \quad (\text{A.8})$$

Como pode ser visto nas Figura 50 e 27, o CE apresenta três regiões definidas de operação, tanto para o controle de corrente quanto para o de potência reativa: (i) capacitiva, onde se comporta puramente como um capacitor. (ii) linear, onde sua potência reativa ou corrente injetada é função da tensão na barra controlada. (iii) indutiva, onde se comporta puramente como um indutor. A equação de controle, a ser adicionada ao problema, é função da faixa onde o CE está operando, sendo definida pelo valor da tensão da barra controlada, ou seja:

- Faixa Capacitiva:

$$V_m < V_m^{\min}$$

- Faixa Linear:

$$V_m^{\max} \geq V_m \geq V_m^{\min}$$

- Faixa Indutiva:

$$V_m > V_m^{\max}$$

Do ponto de vista prático, a inclinação da reta de controle r , a tensão de referência V_0 , a reatância mínima B_{min} e a reatância máxima B_{max} são conhecidos. As tensões mínima e máxima são avaliadas a cada iteração da seguinte forma para o modo de controle de potência reativa:

$$V_m^{max} = V_0 + r \cdot B_{min} \cdot V_m^2 \quad (\text{A.9})$$

$$V_m^{min} = V_0 + r \cdot B_{max} \cdot V_m^2 \quad (\text{A.10})$$

Para o controle de corrente injetada, tem-se:

$$V_m^{max} = V_0 + r \cdot B_{min} \cdot V_m \quad (\text{A.11})$$

$$V_m^{min} = V_0 + r \cdot B_{max} \cdot V_m \quad (\text{A.12})$$

As mudanças no modo de operação do CE podem levar a alterações bruscas no método de Newton-Raphson durante o processo iterativo, e com isto gerar trajetórias de convergência oscilatórias, fazendo com que o sistema se torne não convergente ou até mesmo divergente. De modo a evitar este fato, as mudanças no ponto de operação do CE da faixa capacitiva para a indutiva e vice-versa são feitas obrigando o CE a passar pelo ponto da tensão de referência V_0 na faixa linear.

A potência reativa injetada pelo compensador é atualizada a cada iteração por:

$$Q_{Gk}^{(h+1)} = Q_{Gk}^{(h)} + \Delta Q_{Gk}^{(h)} \quad (\text{A.13})$$

Na coluna adicional da equação (A.7) somente o elemento relativo a equação de $\Delta Q'_k$ não é nulo. Na linha relativa à equação adicional, as derivadas relativas à V_k , V_m e x não serão nulas. As derivadas desta linha dependem da equação associada à região de atuação do equipamento, considerando esta operação:

a) Nas Regiões Capacitiva e Indutiva

Para as regiões indutiva e capacitiva de operação, as equações de controle para as duas modelagens são idênticas, tendo em vista que o equipamento se comporta como uma reatância fixa localizada na barra, em ambos os casos. As equações de controle para as regiões indutiva e capacitiva são dadas pelas equações (A.14) e (A.15), respectivamente.

$$y = Q_{Gk} - B_{min}.V_k^2 = 0 \quad (A.14)$$

$$y = Q_{Gk} - B_{max}.V_k^2 = 0 \quad (A.15)$$

Os resíduos relativos às equações de controle são dados respectivamente por:

$$\Delta y = B_{min}.V_k^2 - Q_{Gk} \quad (A.16)$$

$$\Delta y = B_{max}.V_k^2 - Q_{Gk} \quad (A.17)$$

b) Na Região Linear

Para a região de operação linear em controle de corrente injetada, tem-se a seguinte equação de controle e resíduo, respectivamente:

$$y = V_m - V_0 - r.I_k = 0 \quad (A.18)$$

$$\Delta y = V_0 + r.I_k - V_m \quad (A.19)$$

As equações para o controle de potência reativa injetada e o resíduo associado são dadas por:

$$y = V_m - V_0 - r.Q_{Gk} = 0 \quad (A.20)$$

$$\Delta y = V_0 + r.Q_{Gk} - V_m \quad (A.21)$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB, 2003, *SVC for enhancing of power transmission capability over long AC interconnector*, ABB Utilities AB Power Systems.
- ABB, 2003a, *SVC to stabilize large 735 kV transmission system in Canada*, ABB Power Systems AB.
- ABB, 2005, “FACTS (Flexible AC Transmission Systems): SVC/U”, *ABB Consulting Seminar*, Ludvika, Sweden, June.
- ABB, 2005a, *SVC – Static Var Compesator – An Insurance for improved grid system stability and reliability*, ABB Power Technologies.
- AMENDOLA, M., SOUZA, A. L., BARROS, L. C., 2005, *Manual do uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no MATLAB 6.5*, FEAGRI & IMECC/ UNICAMP. Disponível em: <www.ime.unicamp.br/~laeciocb>. Acesso em: Julho de 2010.
- BANSAL, R. C., 2003, “Bibliography on the *Fuzzy Set Theory Applications in Power Systems (1994-2001)*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, N° 4, pp. 1291-1299.
- BARAN, I. S., 2002, *Mapeamento do valor econômico dos equipamentos de compensação de potência reativa*, Dissertação M.Sc., Pontifícia Universidade Católica – PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BRANDI, E. M., LIMA, M. V. B. C., 2008, “Compensador Estático de Potência Reativa – SVC”, *Workshop – Equipamentos FACTS: Aspectos conceituais, Tecnológicos e de Aplicação - Cigrê Brasil CE-B4*, n° 3, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 24-27 Junho.
- BRANDI, E. M., PAIVA, M. A. F., 2001, *Nota Técnica DEE.O.003.2001 – Comissionamento do Compensador Estático de Campos -60/+100 Mvar / 345 kV*, FURNAS Centrais Elétricas, Julho.

- CEPEL, 2010, *Programa de Análise de Redes / ANAREDE – Manual do Usuário Versão V09-06-00 01/02/2010*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- COSTA, A., RODRÍGUEZ, A., SIMAS, E., *et al.*, 2005, *Lógica Fuzzy: Conceitos e Aplicações*, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Centro de ciências Exatas e Tecnológicas – Exatec.
- COX, E., 1994, *The Fuzzy Systems Handbook*, Massachusetts, Academic Press, Inc.
- EDRIS, A., 2000, “FACTS Technology Development: An Update”, *IEEE Power Engineering Review*, Mar., pp. 4-9
- EL-HAWARY, M. E., 1998, *Electric Power Applications of Fuzzy Systems*, New York, IEEE Press Series on Power Engineering, Series Editor.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2008, *Estudos para Licitação da Expansão da Transmissão - Consolidação das Análises e Pareceres Técnicos - Programa de Expansão da Transmissão – PET ciclo 2009-2013 N° EPE-DEE-RE-139/2008-r0*, EPE. Disponível em: <www.epe.gov.br>. Acesso em: 10 de maio de 2010.
- FERREIRA, L. C. A., 2008, *Análise a longo-termo da estabilidade de tensão utilizando métodos estáticos e um sistema especialista fuzzy para representação de ações de controle*. Tese D.Sc., Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil.
- GAD, A., FAROOQ, M., 2003, “An Overview of *Fuzzy Logic* in Power and Control Systems”, In: *Proceedings of the 46th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems – MWSCAS '03*, Vol. 3, pp. 1047-1050, December.
- GOMIDE, F. A. C., GUDWIN, R. R., TANSCHKEIT, R., 2002, *Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações*, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial – DCA.
- GUPTA, M., QI, J., 1990, “Theory of T-Norms and *Fuzzy Inference Method*”, *Fuzzy Sets and Systems*, N°. 40.
- IEEE, 2000, “Tutorial on *Fuzzy Logic Applications in Power Systems*”, *IEEE-PES Winter Meeting*, Singapore, 23-27 January.

- JUNGES, M. F. D., 2000, *Lógica Fuzzy em Controle de Tensão e Potência Reativa em Sistema de Potência*, Dissertação M.Sc., Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- KANDEL, A., 1986, *Fuzzy Mathematical Techniques with Applications*, Massachusetts, Addison-Wesley, Reading.
- KLIR, G. and FOLGER, T. A., 1988, *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information*, New Jersey, Prentice Hall.
- LIMA, M. V. B. C., 2008, “Aspectos de Proteção e Controle de Equipamentos FACTS Shunt (SVC)”. *Workshop – Equipamentos FACTS: Aspectos conceituais, Tecnológicos e de Aplicação - Cigrê Brasil CE-B4*, n° 4, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 24-27 Junho.
- LIN, C. T., LEE, C. S. G., 1996, *Neural Fuzzy Systems*, New Jersey, Prentice Hall.
- MALIK, O. P., NIEBUR, D. HIYAMA, T., 2000, “Applications Control – Chapter 3 – Tutorial on *Fuzzy Logic Applications in Power Systems*”, *IEEE-PES Winter Meeting*, Singapore, 23-27 January.
- MAMDANI, E. H., 1974, “Application of *Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant*,” *Proceedings of the IEE (Control and Science)*, Vol. 121, pp. 298-316.
- MATHWORKS, 2008, *Fuzzy Logic Toolbox for Use with MATLAB – User’s Guide*, Version 2, EUA, The Math Works, Inc.
- MATHWORKS, 2010, *MATLAB Getting Started Guide*, Version 15, EUA, The Math Works, Inc.
- MEDSKER, L. R., 1995, *Hybrid Intelligent Systems*, Boston, Kluwer Academic Publishers.
- MENDEL, J. M., 1995, “*Fuzzy Logic Systems for Engineering: a Tutorial*”. *Proceedings IEEE*, Vol. 83, pp. 345–377.

- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2008, *Procedimentos Sistêmicos para a Operação da SE Campos*, ONS - Procedimentos de Rede, Módulo 10, Submódulo 10.11, revisão 04. Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: 02 de maio de 2010.
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2010, *Apuração Mensal das Parcelas Variáveis Referentes à Disponibilidade de Instalações da Rede Básica*, ONS - Procedimentos de Rede, Módulo 15, Submódulo 15.12, revisão 1.1. Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: 09 de outubro de 2010.
- PASSOS FILHO, J. A., 2005, *Representação e Avaliação do Desempenho de Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência*, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PASSOS FILHO, J. A., FERREIRA, L. C. A., MARTINS, N., *et al.*, 2003, “Benefícios da Representação do Controle Automático e Discreto de Bancos de Capacitores / Reatores e de LTC Sistêmicos em Estudos de Segurança de Tensão”, *XVII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Uberlândia, MG, Brasil, 19-24 outubro.
- PEDRYCZ, W., GOMIDE, F., 1998, *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design*, Massachusetts, Cambridge: MIT Press.
- PINTO, R. L., FERREIRA, L. C. A., LIMA, R. T., *et al.*, 2009, “As Automações no Processo de Apuração da Transmissão no Regional Sudeste do ONS com o Advento da REN 270/07”, *VIII SIMPASE – Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos*, IT41, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL, 9-14 março.
- REINGHANTZ, P., 2002, “Lógica *fuzzy* e variáveis linguísticas aplicadas na avaliação de desempenho de edifícios de escritório”, *Revista on-line Ambiente Construído – Avaliação Pós-Ocupação (APO) da ANTAC*, Vol. 2, N° 3, pp. 41-56.
- REZENDE, S. O., 2005, *Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações*, Barueri, Ed. Manole.
- ROSS, T. J., 1995, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, New York, McGraw-Hill.

- RUSSEL, S., NORVIG, P., 2004, *Inteligência Artificial*, Rio de Janeiro, Ed. Elsevier.
- SILVA, M. A. S., CECCOPIERI, A. M. G., SANTANA, C. C. C., *et al*, 2003, “Simulação de um Controlador Nebuloso (*Fuzzy*) no Controle de Qualidade da Fabricação das Garrafas PET”, *METROLOGIA – Metrologia para a Vida*, Recife, PE, Brasil, 01-05 Setembro.
- SUGENO, M., KANG, G. T., 1988, “Structure Identification of a *Fuzzy* Model”, *Fuzzy and Sets and Systems*, Vol. 28, N°.1, pp. 15-33.
- TAKAGI, T. and SUGENO, M., 1985, “*Fuzzy* Identification of Systems and its Applications to Modelling and Control”, *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics*, Vol. 15, pp. 116-132.
- TANSCHKEIT, R., 2008, *Sistemas Fuzzy – Tutorial*, Instituto de Computação Aplicada – PUC/RJ. Disponível em: <<http://www.ica.ele.puc-rio.br/novo/disciplines>>. Acesso em: Junho 2008.
- TOMSOVIC, K., 2000, *Chapter IV - Fuzzy Systems Applications to Power Systems Fundamentals*, School of Electrical Engineering and Computer Science.
- TSOUKALAS, L. H., UHRIG, R. E., 1997, *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*. New York, John Wiley & Sons.
- ZADEH, L. A., 1965, “*Fuzzy Sets*”, *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353.
- ZADEH, L. A., 1973, “Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes”, *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-1, pp. 28-44.
- ZIMMERMANN, H. J., 1996, *Fuzzy Set Theory and Its Applications*, 3rd ed., Massachusetts, Kluwer Academic Publishers.