



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PROCEDIMENTOS DE LÓGICA FUZZY NA SOLUÇÃO DE PROBLEMA DE CONTROLE DE TENSÃO E POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS E SUBSISTEMAS DE POTÊNCIA

MESTRANDA: BERNADETE MARIA DE MENDONÇA NETA
ORIENTADOR: PROF. DR. PETR IAKOVLEVITCH EKEL

BELO HORIZONTE, MG
MAIO 2005

Bernadete Maria De Mendonça Neta

Procedimentos de Lógica Fuzzy na Solução de Problema de
Controle de Tensão e Potência Reativa em Sistemas
e Subsistemas de Potência

Orientação:

Prof. Dr. Petr Iakovlevitch Ekel

Dissertação apresentada ao
programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, da Pontifícia
Universidade Católica de Minas
Gerais – PUC-MG, como requisito
parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Belo Horizonte, MG

Maiο 2005

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, Odete, pelo exemplo de conduta e honestidade e pelo apoio que sempre me deu, estando sempre disposta a me auxiliar no que fosse preciso.

Ao meu esposo, Rogério Braga, que esteve sempre ao meu lado, incentivando e apoiando esta caminhada. Pela paciência e tranqüilidade, invejáveis, durante os momentos difíceis.

Aos meus filhos, Ana Paula e Pedro Henrique, pela compreensão, carinho e solidariedade nas horas difíceis.

AGRADECIMENTOS

À CEMIG, pela ajuda financeira e a importante oportunidade de desenvolvimento e aplicação desse trabalho. Em especial aos engenheiros Maria Helena Barbosa, Alexandre F. M. Bueno, Ricardo L. J. Carnevalli, Ricardo C. de Brito e Francisco de Assis A. Silva.

Ao professor Petr Iakovlevitch Ekel, pela orientação, atenção, paciência e carinho com que conduziu e orientou este trabalho. Agradeço sua grandiosa e oportuna colaboração e demonstro aqui, com estas palavras, o meu mais profundo respeito e admiração.

Aos colegas da CEMIG que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho, o meu muito obrigada pelas suas importantes e oportunas contribuições.

Aos professores e colaboradores do PPGE - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-MINAS, sem os quais o sucesso nessa jornada não seria possível.

À todos que de maneira direta ou indiretamente contribuíram para viabilização desse trabalho.

Ao meu amado esposo Rogério Braga, pelo apoio, carinho, atenção e paciência durante minha dedicação aos estudos, obrigada por cuidar muito bem de mim e de nossos filhos.

Ao meu querido filho Pedro Henrique pela compreensão quando da falta de um colo.

À minha querida filha Ana Paula pela ajuda incondicional em todas as fases de desenvolvimento desse trabalho.

À minha querida mãe Odete e irmãos: M^a. De Lourdes, M^a. Aparecida, M^a. Luiza e Ananias por sempre me apoiarem e conduzirem aos bons caminhos da vida.

À família de meu marido pelos constantes incentivos e compreensão por minhas constantes ausências.

Ao meu querido amigo João da R. Medrado Neto pelo apoio nos assuntos técnicos de engenharia e pela sincera amizade, e a todos os amigos que me acompanharam pacientemente nesta jornada.

Agradeço, em especial, a DEUS, que está sempre ao meu lado nos momentos tranquilos e me carrega em seus braços nos momentos mais difíceis de minha vida.

HOMENAGEM

À Fernando Sabino

A Última Crônica

“(...) A perspectiva me assusta. Gostaria de estar inspirado, de coroar com êxito mais um ano nesta busca do pitoresco ou do irrisório no cotidiano de cada um. Eu pretendia apenas recolher da vida diária algo de seu disperso conteúdo humano, fruto da convivência, que a faz mais digna de ser vivida. Visava ao circunstancial, ao episódico. Nesta perseguição do acidental, quer num flagrante de esquina, quer nas palavras de uma criança ou num acidente doméstico, torno-me simples espectador e perco a noção do essencial. Sem mais nada para contar, curvo a cabeça e tomo meu café, enquanto o verso do poeta se repete na lembrança: "assim eu quereria o meu último poema". Não sou poeta e estou sem assunto. Lanço então um último olhar fora de mim, onde vivem os assuntos que merecem uma crônica.(...)”

Fernando Sabino

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo geral o aumento da eficiência na solução de um dos mais importantes problemas de engenharia de energia elétrica: o controle coordenado “on-line” de tensão e potência reativa em sistemas e subsistemas de potência, baseando-se no desenvolvimento de modelos, métodos e um sistema de controle (destinado a trabalhar interligado com o sistema SCADA e correspondente Estimador de Estado), integrando técnicas numéricas tradicionais e a tecnologia da teoria dos conjuntos fuzzy (lógica fuzzy).

Para atingir este objetivo, foram estudados e comparados, de diferentes pontos de vista que refletem as características de qualidade dos modelos fuzzy, os procedimentos de lógica fuzzy associados com diversos esquemas de inferência fuzzy e defuzzificação. Foram também analisadas as variações nas descrições lingüísticas dos parâmetros (alteração dos números de variáveis lingüísticas, valores fuzzy, formas das funções de pertinência, simetrias e bases das mesmas) incorporados nas regras de produção fuzzy. Os estudos foram realizados com base na utilização do software Matlab. Para complementação e detalhamento dos procedimentos de lógica fuzzy necessários para estudos, foi desenvolvido e aplicado um software experimental - sistema computacional PLF.

A análise comparativa dos procedimentos de lógica fuzzy foi baseada na utilização de uma técnica de tomada de decisões em ambiente fuzzy. A utilização desta técnica permitiu a avaliação comparativa de uma das características da qualidade dos modelos fuzzy que reflete sua adequação.

As recomendações do presente trabalho são utilizadas no desenvolvimento do sistema de controle de tensão e potência reativa elaborado dentro do projeto "Desenvolvimento de Funções Avançadas de EMS (Energy Management System) para Sistemas de Subtransmissão de Energia Elétrica" suportado pela ANEEL.

ABSTRACT

The general objective of this work is to increase the efficiency in the solution of one of the most important problems of electric power engineering: the coordinated "on-line" control of voltage and reactive power in power systems and subsystems on the basis of developing models, methods and, a control system (destined to work in interaction with the SCADA system and corresponding State Estimator), integrating traditional numeric techniques with fuzzy set theory technology (fuzzy logic).

To reach this objective, fuzzy logic procedures associated with diverse schemes of fuzzy inference and defuzzification have been studied and compared from the different points of view, which reflect fuzzy model quality characteristics. The variations of parameter linguistic descriptions (alterations of linguistic variable numbers, fuzzy values, membership function shapes, symmetries, and their bases) incorporated in fuzzy production rules have been analyzed as well. The studies have been realized on the basis of utilizing Matlab software. To complement fuzzy logic procedures, necessary for studies, and work out in detail with them, experimental software (a computational system PLF) has been developed and applied.

The comparative analysis of fuzzy logic procedures has been based on utilizing a technique for decision-making in a fuzzy environment. The utilization of this technique has permitted one to carry out the comparative evaluation of the characteristic of fuzzy model quality, which reflects its adequacy.

The recommendations of the present work are utilized in the development of a system of voltage and reactive power control elaborated within the framework of the project "Development of Advanced Functions of EMS (Energy Management System) for Electric Energy Subtransmission Systems" supported by ANEEL.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	II
AGRADECIMENTOS	III
HOMENAGEM	IV
RESUMO.....	V
ABSTRACT	VI
SUMÁRIO.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTA DE SIMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XIII
ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	XIV

CAPÍTULO 1

CONTROLE DE TENSÃO E POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS E

SUBSISTEMAS DE POTÊNCIA	1
1.1. Introdução	1
1.2. Controle de tensão e potência reativa.....	2
1.3. Dispositivos para controle de tensão e potência reativa.....	4
1.4. Setor elétrico brasileiro	5
1.5. Mercado de energia elétrica.....	6
1.6. Projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) - CEMIG/ANEEL	6
1.7. Importância da pesquisa e estado da arte	10
1.8. Objetivos da dissertação	14

CAPÍTULO 2

TECNOLOGIA FUZZY EM CONTROLE DE TENSÃO E POTÊNCIA

REATIVA.....	16
2.1. Considerações gerais	16
2.2. Lógica fuzzy em problemas de sistemas elétricos de potência	18
2.3. Variáveis lingüísticas e regras fuzzy de produção.....	19
2.4. Adaptações das regras da base de conhecimento	23
2.5. Construção dos coeficientes de sensibilidade	24
2.6. Fuzzyficação.....	36
2.7. Valores fuzzy das variáveis lingüísticas.....	39
2.8. Apresentação das regras da base de conhecimento.....	48

CAPÍTULO 3

INFERÊNCIA FUZZY: ESQUEMAS E SEUS ESTUDOS	52
3.1. Considerações gerais	52
3.2. Inferência fuzzy	52
3.3. Noção de entropia na avaliação da qualidade da inferência fuzzy	66
3.4. Cálculo da entropia da saída da inferência	67

CAPÍTULO 4

DEFUZZYFICAÇÃO: ESQUEMAS E SEUS ESTUDOS	72
4.1. Defuzzyficação	72
4.2. Estudo de caso	76
4.3. Descrição dos experimentos realizados	81
4.4. Elaboração da saída do sistema de controle.....	86

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DA QUALIDADE DOS MODELOS FUZZY	103
5.1. Qualidade do modelo fuzzy.....	103
5.2. Tomada de decisões multicritério em ambiente fuzzy e sua aplicação na avaliação da adequação dos modelos fuzzy.....	104
5.3. Estimativas de desvios entre a solução “padrão” e os resultados de defuzzyficação encontrados	108
5.4. Descrição dos cálculos de distâncias realizados	110
5.5. Preparação das informações para avaliação final	127
5.6. Avaliação final	135

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PROPOSIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	139
6.1. Conclusões do trabalho	139
6.2. Publicações associadas com esta dissertação.....	142
6.3. Proposições para trabalhos futuros	142

ANEXO I

GRÁFICOS DE ALGUMAS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA UTILIZADAS NESSE TRABALHO.....	144
--	------------

ANEXO II

GRÁFICOS DE ALGUMAS DAS SUPERFÍCIES DE CONTROLE OBTIDAS	150
--	------------

ANEXO III

INTERFACE GRÁFICA E CÓDIGO FONTE DO SOFTWARE

EXPERIMENTAL PARA CONTROLE FUZZY (PLF)..... 159

ANEXO IV

REGRAS DA BASE DE CONHECIMENTO 169

ANEXO V

EXEMPLO DE CÁLCULO DA SAÍDA DO SISTEMA DE CONTROLE..... 185

ANEXO VI

RESULTADOS DE EXPERIMENTOS REALIZADOS..... 187

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 191

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1</i> – Estrutura básica do sistema de controle	9
<i>Figura 2.1</i> – Valores fuzzy	22
<i>Figura 2.2</i> – Malha de distribuição da região Metropolitana de Belo Horizonte (Centro)	28
<i>Figura 2.3</i> – Função de pertinência trapezoidal	37
<i>Figura 2.4</i> – Função de pertinência triangular	37
<i>Figura 2.5</i> – Função de pertinência gaussiana	38
<i>Figura 2.6</i> – Função de pertinência sigmoideal	38
<i>Figura 2.7</i> – Funções de pertinência dos valores fuzzy para variável lingüística <i>eficiência de controle</i>	42
<i>Figura 2.8</i> – Função de pertinência dos valores fuzzy para variável lingüística <i>Margem adequada</i> (dispositivo x_1)	44
<i>Figura 2.9</i> – Funções de pertinência dos valores fuzzy para para variável lingüística <i>margem adequada</i> (dispositivo x_2)	44
<i>Figura 2.10</i> – Funções de pertinência dos valores fuzzy para para variável lingüística <i>margem adequada</i> (dispositivo x_3)	45
<i>Figura 2.11</i> – Funções de pertinência dos valores fuzzy para para variável lingüística <i>margem adequada</i> (dispositivo x_4).....	45
<i>Figura 2.12</i> – Funções de pertinência dos valores fuzzy para para variável lingüística <i>margem adequada</i> (dispositivo x_5)	45
<i>Figura 2.13</i> – Funções de pertinência dos valores fuzzy para variável lingüística <i>incremento de perdas</i>	47
<i>Figura 2.14</i> – Funções de pertinência dos valores fuzzy para variável lingüística <i>intensidade de utilização</i>	48
<i>Figura 3.1</i> – Função de pertinência de A	56
<i>Figura 3.2</i> – Função de pertinência de B	56
<i>Figura 3.3</i> – Função de pertinência de A'	56
<i>Figura 4.1</i> – Aplicação dos sete (7) métodos de defuzzyficação (SM, BA, CM, CA, MM, CS e LM) na saída da inferência fuzzy.....	74

ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 2.1</i> – Matriz para o planejamento 2^3	25
<i>Tabela 2.2</i> – Dados dos fatores calculados de acordo com os percentuais de variação sobre a tensão dos dispositivos de controle no caso base	29
<i>Tabela 2.3</i> – Dados obtidos através dos experimentos no PSS/E baseados nos sinais da tabela 2.1 e nas variações da tabela 2.2	30
<i>Tabela 2.4</i> – Coeficientes (normalizados) dos modelos, para tensão e perdas	31
<i>Tabela 2.5</i> – Resultados dos cálculos de \hat{y}_n para tensão	35
<i>Tabela 2.6</i> – Resultados dos cálculos de \hat{y}_n para perdas	35
<i>Tabela 2.7</i> – Coeficientes de sensibilidade de tensão ($[S_{ij}^V]$) e perdas ($[S_j^L]$)	36
<i>Tabela 2.8</i> – Faixas dos valores fuzzy para a variável lingüística <i>eficiência de Controle</i>	41
<i>Tabela 2.9</i> – Adequação dos <i>coeficientes de sensibilidade</i> para a barra controlada $i = 964$, ao intervalo $[0, 1]$	41
<i>Tabela 2.10</i> – Resultado do cálculo das pertinências para <i>eficiência de controle</i> (função trapezoidal e triangular)	41
<i>Tabela 2.11</i> – Dados das variáveis de controle (níveis existentes e limites permissíveis dos dispositivos j) em relação a barra $i = 964$	43
<i>Tabela 2.12</i> – Resultado do cálculo das pertinências de <i>margem adequada</i> (função trapezoidal e triangular)	44
<i>Tabela 2.13</i> – Faixas para 3 valores fuzzy para a variável lingüística <i>incremento de Perdas</i>	46
<i>Tabela 2.14</i> – Adequação dos resultados do cálculo do <i>incremento de perdas</i> ao intervalo de $[-1, +1]$	46
<i>Tabela 2.15</i> – Resultado do cálculo das pertinências (função trapezoidal)	47
<i>Tabela 2.16</i> – Valores das variáveis lingüísticas de entrada (<i>eficiência de controle, margem adequada e incremento de perdas</i>)	47
<i>Tabela 2.17</i> – Matriz de regras para duas variáveis de entrada e três valores fuzzy	49
<i>Tabela 2.18</i> – Matriz de regras para duas variáveis de entradas e cinco valores fuzzy	49
<i>Tabela 2.19</i> – Matriz de regras para duas variáveis de entrada e sete valores fuzzy ...	49
<i>Tabela 2.20</i> – Matriz de regras para duas variáveis de entrada e nove valores fuzzy ..	50
<i>Tabela 3.1</i> – Matriz de relação fuzzy	57
<i>Tabela 3.2</i> – Matriz de resultados	64
<i>Tabela 3.3</i> – Saída da inferência ($\mu_{B'}(u)$) para todos os dispositivos j	68
<i>Tabela 3.4</i> – Resultados dos cálculos da entropia fuzzy na forma normalizada, para as inferências, considerando todos os dispositivos j	71
<i>Tabela 4.1</i> – Vetores de possibilidades	78
<i>Tabela 4.2</i> – Vetores de saída com a contribuição de cada regra para o dispositivo x_2	80
<i>Tabelas 4.3 a 4.52</i> – Resultados de experimentos realizados	89

<i>Tabela 5.1</i> – Resultados obtidos utilizando a técnica de tomada de decisão multicritério em ambiente fuzzy, para regras do tipo I	107
<i>Tabela 5.2</i> – Resultados obtidos utilizando a técnica de tomada de decisão multicritério em ambiente fuzzy, para regras do tipo II	107
<i>Tabelas 5.3 a 5.45</i> – Resultados de desvios calculados	116
<i>Tabela 5.46</i> – Resumo dos resultados de pertinências para regras do tipo I, para 3 e 5 valores fuzzy, inferência max-min e max-produto	132
<i>Tabela 5.47</i> – Resumo dos resultados de pertinências para regras do tipo I, para 5 valores fuzzy, inferência max-min-produto e max-produto-min	132
<i>Tabela 5.48</i> – Resumo dos resultados de pertinências para regras do tipo I, para 7 e 9 valores fuzzy, inferência max-min e max-produto	133
<i>Tabela 5.49</i> – Resumo dos resultados de pertinências para regras do tipo II, para 3 e 5 valores fuzzy, inferência max-min e max-produto	133
<i>Tabela 5.50</i> – Resumo dos resultados de pertinências para regras do tipo II, para 7 valores fuzzy, inferência max-min e max-produto	134
<i>Tabela 5.51</i> – Resumo dos resultados de pertinências para níveis de complexidade.....	134

LISTA DE SIMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP	-	Sistema Elétrico de Potência
MW	-	Mega Watts (Potência Ativa)
VAr	-	Volt-Amperes Reativo (Potência Reativa)
RAT	-	Regulador Automático de Tensão
CER	-	Compensador Estático Reativo
ANEEL	-	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CEMIG	-	Companhia Energética de Minas Gerais
SCADA	-	Supervisory Control and Data Acquisition (Supervisão, Controle e Aquisição de Dados)
xOMNI	-	Sistema SCADA – CEMIG
COD	-	Centro de Operação da Distribuição
COS	-	Centro de Operação do Sistema
EMS	-	Energy Management System (Sistema de Gerenciamento de Energia)
MAE	-	Mercado Atacadista de Energia
ONS	-	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P&D	-	Pesquisa e Desenvolvimento
CA	-	Defuzzyficação Centro de Área
BA	-	Defuzzyficação Bissetor de Área
MM	-	Defuzzyficação Média dos Máximos
SM	-	Defuzzyficação Menor dos Máximos
LM	-	Defuzzyficação Último dos Máximos
CS	-	Defuzzyficação Centro da Soma
CM	-	Defuzzyficação Centro dos Máximos
S_{ij}^V	-	Coefficiente de Sensibilidade de Tensão
S_{ij}^L	-	Coefficiente de Sensibilidade de Perdas
$[S_{ij}^V]$	-	Matriz de Coeficientes de Sensibilidade de Tensão
$[S_{ij}^L]$	-	Matriz de Coeficientes de Sensibilidade de Perdas
$D(y)_{ad}$	-	Dispersão de Adequação
$D(y)_{rep}$	-	Dispersão de reprodutibilidade
$d(A)$	-	Entropia
$d(A_N)$	-	Entropia normalizada
$d_m(A_N)$	-	Valores médios de entropia normalizada
u^*	-	Intensidade de utilização dos dispositivos de controle
$d^m(A, B)$	-	Desvios médios
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	-	Valores de pertinência dos desvios médios

ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Capítulo 1 – Controle de Tensão e Potência Reativa em Sistemas e Subsistemas de Potência

Este capítulo é dedicado a consideração geral de um dos mais importantes problemas de engenharia de energia elétrica – o problema de controle de tensão e potência reativa em sistemas e subsistemas de potência. O capítulo inclui uma análise breve de literatura associada com diversas abordagens para a solução do problema citado, desde abordagens tradicionais, até abordagens mais avançadas, as quais incluem sistemas especialistas e sistemas baseados na lógica fuzzy. A análise permitiu formular o objetivo do presente trabalho e suas tarefas.

Capítulo 2 – Tecnologia fuzzy em controle de tensão e potência reativa

Neste capítulo são considerados os diferentes aspectos da teoria da lógica fuzzy e suas aplicações, particularmente em problemas de engenharia de energia elétrica. O capítulo inclui uma consideração das regras de produção fuzzy aplicáveis para a solução do problema de controle de tensão e potência reativa. Para essas regras é realizada a construção das correspondentes variáveis linguísticas. Levando em consideração que regras são baseadas na utilização dos diversos tipos de índices de sensibilidade, técnicas de sua construção baseadas no planejamento de experimento são consideradas. Essas técnicas são utilizadas para a construção de índices de sensibilidade para o subsistema do sistema de subtransmissão da CEMIG.

Capítulo 3 – Inferência fuzzy: Esquemas e seus estudos

Este capítulo é dedicado ao estudo e análise de diferentes esquemas de inferência fuzzy. O capítulo inclui a consideração dos elementos da teoria da possibilidade, a qual é utilizada para realização das inferências, evitando assim os complexos algoritmos multidimensionais. Como esquemas básicos da inferência são utilizados o modelo de

Mamdani e o modelo de Larsen. Além disso, são consideradas as modificações desses esquemas. Para uma avaliação da qualidade dos esquemas da inferência fuzzy, é utilizada uma medida do grau de nebulosidade da saída da inferência fuzzy (entropia fuzzy).

Capítulo 4 – Defuzzyficação: Esquemas e seus estudos

Neste capítulo, são considerados e analisados os diversos métodos para defuzzyficação. A análise abrange os seguintes métodos: Centro de Área, Centro das Somas, Bissetor de Área, Centro dos Máximos, Média dos Máximos, Menor dos Máximos e Último dos Máximos. No capítulo são apresentados os resultados dos diversos experimentos computacionais realizados, incluindo um estudo de caso o qual contempla todas as fases do controle fuzzy.

Capítulo 5 – Análise da qualidade dos modelos fuzzy

Este capítulo inclui um estudo amplo sobre a qualidade dos modelos fuzzy. Os elementos de tomada de decisões multicritério em ambiente fuzzy são utilizados para a construção dos valores considerados “padrões” para a avaliação da qualidade dos modelos fuzzy. Com base em medida de distâncias (distância Euclidiana), é possível avaliar os desvios entre os valores “padrões” e os resultados obtidos nos experimentos computacionais. Estes desvios são utilizados para avaliação da adequação do modelo fuzzy, que em conjunto com avaliação do nível de complexidade, permitirá a avaliação da qualidade dos modelos fuzzy.

Capítulo 6 – Conclusões e proposições para trabalhos futuros

Neste capítulo, é realizada a conclusão de todo o trabalho desenvolvido ao longo da dissertação, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Anexos:

Nos anexos são incluídos os seguintes materiais, distribuídos em seis seções: gráficos de funções de pertinência utilizados, gráficos de superfícies de controle, interfaces gráficas e código fonte do software PLF, regras da base de conhecimento, exemplo de cálculo de

saída do sistema de controle, resultados de experimentos computacionais considerando a função de pertinência sigmoidal e resumos dos valores de pertinências calculados com base em tomada de decisões multicritério em ambiente fuzzy, considerando os resultados de desvios médios calculados.

CAPÍTULO 1

CONTROLE DE TENSÃO E POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS E SUBSISTEMAS DE POTÊNCIA

1.1. Introdução

Em virtude da evolução dos sistemas elétricos de potência (SEP's) e das rígidas condições de operação, se faz necessário um melhor e mais eficiente gerenciamento do perfil de tensão e do fluxo de potência reativa dos SEP's, de modo a aumentar a sua segurança operacional e a otimizar o uso das fontes de potência reativa [1-5]. O controle de tensão e potência reativa contribui, também, em termos de qualidade e economia na operação dos sistemas elétricos de potência.

Controlar o valor da tensão suprida aos usuários de uma concessionária é tão importante quanto fornecer a quantidade correta de potência ativa à carga (MW) na frequência adequada. As tensões devem permanecer dentro de faixas bastante estreitas para que os equipamentos elétricos dos usuários, bem como os equipamentos do sistema de potência, funcionem corretamente, sem que sofram danos [2],[5-8].

Os equipamentos dos sistemas de transmissão e subtransmissão, tais como: transformadores, disjuntores e outros, podem ser danificados por tensões excessivas de longa duração. Como os equipamentos dos SEP's são, geralmente, de custos bastante elevados, além de serem essenciais à confiabilidade do sistema, consideraremos aumentada ainda mais a importância de se controlar a tensão no sistema e subsistema de potência. Este controle é especialmente importante para o operador, que tem como dever observar e manter continuamente os padrões de tensão predefinidos [7],[8].

1.2. Controle de tensão e potência reativa

Os níveis de tensão dependem grandemente do fluxo de potência reativa do sistema. Quando há deficiência de potência reativa, o nível de tensão abaixa. Inversamente, quando há excesso de potência reativa, o nível de tensão aumenta. Portanto, controla-se os níveis de tensão em um sistema elétrico controlando a geração, a absorção e o fluxo de volt-ampères reativos (VAr) no sistema [2].

Com o avanço tecnológico, os SEP's estão a cada dia mais bem equipados com diversos tipos de dispositivos, os quais podem ser usados para o controle de tensão e compensação de potência reativa (geradores com tensão ou potência reativa controladas, transformadores com mudança de taps, capacitores, reatores shunt, compensadores síncronos e fontes estáticas de potência reativa). A utilização desses dispositivos, em geral, deve ser direcionada ao controle de tensão e potência reativa em sistemas de potência com o objetivo de satisfazer os seguintes requisitos técnicos [3-5],[9-11]:

- restrições nos níveis de tensão nas barras do sistema, definidas pelas considerações de segurança dos sistemas de potência (tolerância dos equipamentos), assim como pelas condições do controle de tensão em subestações alimentadoras dos sistemas de distribuição (isto é causado pelo limitado alcance disponível da regulação para controle de tensão nestas subestações, a fim de fornecer qualidade normalizada de energia aos terminais dos consumidores);
- restrições na capacidade de potência dos elementos das redes;
- restrições nas capacidades disponíveis dos dispositivos para controle de tensão e das fontes de potência reativa.

Esses requisitos devem ser satisfeitos para várias condições de operação, definidas pela variação de carga dos consumidores, de acordo com os ciclos tecnológicos, sazonais, de iluminação e pelas alterações na configuração do sistema.

Além disso, o controle de tensão e potência reativa está associado com a minimização das perdas, que em geral (como diferenciado em [3],[5],[10],[11], por exemplo), devem incluir as perdas de transmissão, assim como as perdas nas fontes de potência reativa [4],[9],[11]. Esse é o objetivo econômico.

Esta colocação do problema é geral, aplicável a todo sistema de potência. Porém, no processo de resolução de problemas reais, é necessário considerar condições específicas, definidas, por exemplo, pela filosofia operacional do sistema de potência, pelo estado de seus equipamentos, etc.

Os dispositivos para controle de tensão e compensação de potência reativa são equipados com reguladores, que podem manter a tensão ou a geração de potência reativa, de acordo com leis de regulação dadas com antecedência (estas leis são construídas durante o processo de planejamento dos modos de operação dos sistemas de potência [4]). Entretanto, no processo de operação, surgem mudanças nos modos de operação, em comparação com os índices planejados: ocorrem variações topológicas do sistema, variações dinâmicas das cargas, variações na composição da geração, etc. Como resultado, os modos de operação reais podem ser diferentes daqueles planejados. Por isso, o controle de tensão e potência reativa, de acordo com as leis de regulação planejadas, pode ser inadequado para as reais condições e não dar os efeitos que seriam alcançados com o controle em tempo real [4]. Além disso, os esquemas de controle local ou individual de tensão e potência reativa, muitas vezes falham ou ocasionam certos resultados indesejáveis, considerados em [5]. Esses tipos de problemas podem ser resolvidos mediante um controle centralizado ou descentralizado com esforços coordenados do controle local.

O constante crescimento da carga, que torna mais complexos os modos de operação dos sistemas, e a diminuição da capacidade de transmissão de energia para acomodar esse crescimento, resultam no aumento da importância dos problemas de controle de tensão e de potência reativa [11],[12], o que também confirma a necessidade de transição para o controle coordenado de tensão em tempo real. Ao mesmo tempo, a introdução de elementos dos sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) e mais tarde, sistemas SCADA por completo, na prática de operação de sistemas de potência, abriram

possibilidades técnicas para a transição para o controle coordenado em tempo real da tensão e da potência reativa.

Deste modo, foi criada a possibilidade para a aplicação de muitas abordagens, baseadas na programação matemática para resolver os problemas em tempo real. Entretanto, sua aplicação na prática encontrou dificuldades devido à natureza específica dos problemas e algumas deficiências [13] da própria abordagem o que limita sua gama de aplicações. Além disso, a otimização do fluxo de potência na forma tradicional não fornece, em muitos casos, a correspondente adequação para o controle em tempo-real [10],[14]. Em regra, o problema é resolvido por operadores experientes [14-16]. Levando isso em conta, pesquisadores exploraram outras possibilidades. Em particular, foram explorados o uso de técnicas de sistemas especialistas e depois o uso de técnicas de sistemas especialistas fuzzy. As últimas mostraram melhores resultados sob diferentes pontos de vista.

O presente trabalho é dedicado a utilizar-se da tecnologia de lógica fuzzy na resolução do problema de controle de tensão e potência reativa bem como o aumento da eficiência de seus procedimentos, através da análise comparativa entre seus métodos.

1.3. Dispositivos para controle de tensão e potência reativa

O controle dos níveis de tensão é realizado através do gerenciamento da produção, do consumo e do fluxo de potência reativa em todas as partes do sistema. O gerenciamento do fluxo de potência reativa, efetuado de forma adequada, é necessário para, dentre outras razões [1],[2],[5]:

- Garantir um maior e melhor aproveitamento do sistema elétrico existente;
- Propiciar equilíbrio no balanço geração/consumo de potência reativa;
- Ajustar os fatores de potência tanto da carga quanto da rede;
- Disponibilizar para a operação uma condição adequada para o controle de tensão e, principalmente, o atendimento ao sistema.

Os equipamentos utilizados para o controle de tensão e potência reativa podem ser classificados da seguinte forma:

- Fontes de potência reativa, tais como geradores síncronos, capacitores e reatores shunt, compensadores síncronos e compensadores estáticos de reativos;
- Compensadores de reatância de linhas, tais como os capacitores série;
- Equipamentos reguladores, tais como transformadores com dispositivo para comutação de tap e os reguladores de tensão.

Os capacitores e reatores shunt fornecem uma compensação passiva ao sistema, podendo estar tanto conectados continuamente ao sistema ou sendo inseridos à medida que forem variando a potência reativa das cargas. Os compensadores síncronos e os compensadores estáticos de reativos, juntamente com os capacitores série fornecem uma compensação ativa, uma vez que o montante de potência reativa fornecida ou absorvida por eles é automaticamente ajustado, de modo a manter o perfil de tensão nas barras onde estes estão conectados.

1.4. Setor elétrico brasileiro

Os padrões de qualidade e continuidade de fornecimento de energia elétrica estão a cada dia mais exigentes e rigorosos. Sendo assim, exigem melhorias nos serviços prestados pelas concessionárias, sobre as quais são refletidos o constante desenvolvimento industrial e conseqüentemente o crescimento da carga. Desta maneira, se faz necessária à realização da transição das técnicas adotadas, para técnicas mais eficazes, visando atender os requisitos pré-estabelecidos pelo agente regulador, que no Brasil é representado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e, também, reduzir as perdas de potência e energia. Este órgão tem, como objetivo principal, traçar diretrizes para a indústria de energia elétrica e fiscalizar o cumprimento da legislação vigente. As normas editadas pela ANEEL exigem uma operação segura e eficiente, aliada à garantia de uma boa rentabilidade do negócio de venda de energia elétrica por parte das concessionárias, conforme a Resolução nº 505, de 26 de novembro de 2001 [7], que estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, impondo desafios aos profissionais responsáveis pelo planejamento e operação do sistema elétrico. Neste contexto, a minimização das perdas, o controle de

tensão e potência reativa e a manutenção do perfil de tensão do sistema em níveis seguros e contínuos, são fatores essenciais para o sucesso na busca em atingir os requisitos [17-19].

1.5. Mercado de energia elétrica

Desde o início da década de 80, os esforços de reestruturação do setor elétrico receberam a grande atenção em volta do mundo. Aproximadamente 20 países desenvolviam mercados de energia elétrica [20] com o objetivo principal de introduzir a competição em indústria de energia elétrica. O processo de reestruturação, em medida completa, envolve o setor elétrico do Brasil [21]. Considerando isso, é necessário indicar que em esforços de reestruturação do setor elétrico, a atenção predominante foi dada à criação de mercados de energia elétrica. As questões de desenvolvimento de mercados de serviços ancilares [20], recebiam uma atenção muito pequena até que se instituiu o decreto nº 2655–ANEEL, regras do Mercado Atacadista de Energia (MAE) e Estatuto do Operador Nacional do Sistema (ONS) [22]. Isso demanda a realização das novas funções adicionais no processo de controle de tensão e potência reativa. Levando isso em consideração, é necessário indicar que as questões de interação de mercados "spot" com os mercados de serviços ancilares são considerados em [23]. O trabalho justifica a racionalidade de estruturação dos mercados de serviços ancilares com base em dois níveis: o mercado (uma semana) de preparação de serviços ancilares e o mercado (tempo real) de serviços ancilares. Esta organização de planejamento e operação de potência reativa em ambiente desregulamentado pode e deve ser levada em consideração na realização das funções do sistema de controle de tensão e potência reativa.

1.6. Projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) - CEMIG/ANEEL

A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) é uma das quatro maiores companhias de energia elétrica do mundo, é responsável por uma área de concessão de 567.000 km² com 5.700.000 consumidores, 774 municípios e 5.415 localidades. A rede de distribuição de energia elétrica que atende ao Estado de Minas Gerais, possui mais de 325 mil quilômetros de extensão, sendo a maior da América Latina. Possui mais de 20 mil quilômetros de linhas de subtransmissão (com níveis de tensão que variam de 23 kV até

161 kV), possuindo 388 subestações da subtransmissão e 500.000 transformadores de distribuição [24].

O projeto de automação, que presentemente é executado na CEMIG, foi dividido em 2 etapas distintas. A primeira é caracterizada como fase SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) e a segunda como fase EMS (*Energy Management System*). Na fase SCADA, cujos desenvolvimentos já estão concluídos, a CEMIG vem substituindo os antigos “softwares” de supervisão e controle dos COD’s (Centro de Operação da Distribuição). Esta necessidade se deu em função dos mesmos já não acompanharem a crescente demanda de dados e informações que toda a empresa, e não só os centros de controle, necessitam para as suas atividades de rotina, que se tornam cada vez mais exigentes e com necessidades muito mais próximas do tempo real. Baseando-se nestas necessidades tomou-se como premissa para o projeto, o compromisso de atender estas áreas em tempo real, sem interferir na operação, e nem tampouco reduzir a segurança exigida por sistemas desse porte. Na fase EMS, os módulos a serem agregados ao SCADA serão desenvolvidos sob a égide de um Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento: “Desenvolvimento de Funções Avançadas EMS para Sistema de Subtransmissão de Energia Elétrica” apoiado pela ANEEL.

Este projeto de P&D se dá através de parcerias com as universidades UNICAMP, PUC-MINAS e a empresa AUDIOLAB:

a) Escopo da parceria com UNICAMP

A UNICAMP já possui bibliotecas EMS, as quais, já se encontram instaladas e testadas em diversos COS’s (*Centro de Operação do Sistema*) de empresas nacionais. Portanto, será responsável pela adequação e desenvolvimentos necessários destas bibliotecas EMS, no sentido de atender as necessidades da subtransmissão da CEMIG. As funções de análise de redes necessárias para a obtenção do modelo em tempo-real do sistema de subtransmissão da CEMIG são:

- Configurador de Redes: usa dados brutos como estado de chaves e a base de dados de configuração da rede para montar a rede elétrica atual. Realizando, ainda, a alocação de medidas na rede montada.

Esta função deverá ser desenvolvida especialmente para este projeto e depende do tipo de base de dados e de como os dados estarão armazenados. A definição da base e das estruturas de dados para mapear a rede de subtransmissão da CEMIG será realizada em conjunto entre UNICAMP, AUDIOLAB e CEMIG.

- Analisador de Observabilidade: utilizando-se o modelo de observabilidade numérica (desenvolvido pela UNICAMP e já amplamente testado e validado), se obtém as partes observáveis, partindo da rede montada e das medidas atuais.
- Estimador de Estado: usando modelo “desacoplado-rápido”, obtém-se o estado observável da rede (magnitude e ângulos das tensões das barras) e, ainda uma lista de medidas com erros grosseiros, se existirem.
- Fluxo de Potência: utilizando método “desacoplado”, obtém estado da rede de interesse (rede que se deseja estudar) preservando o estado estimado nas ilhas e usando circuitos equivalentes para partes não observáveis e dados de previsão.
- Análise de Contingências: tendo o modelo em tempo-real disponível, realizam-se análises linearizadas visando descobrir contingências críticas das quais as mais críticas são simuladas assim como outras de opção do operador.

b) Escopo da parceria com PUC-MINAS

Dentro do contexto da parceria com a PUC-MINAS, neste projeto de P&D, se encontra o módulo de Controle Coordenado “on-line” de Tensão e Potência Reativa, o qual será abordado, em parte, nesse trabalho de dissertação [24],[25].

O sistema de controle, que será desenvolvido, é dedicado para trabalhar interagindo com o sistema SCADA e correspondente Estimador de Estado (*Figura 1.1*), integrando técnicas numéricas tradicionais com a tecnologia da teoria dos conjuntos fuzzy (lógica fuzzy). A

aplicação da lógica fuzzy para a resolução do problema citado está associada com o fato de que ela está se tornando uma das mais bem sucedidas tecnologias da atualidade para desenvolvimento de sofisticados sistemas de suporte a tomadas de decisões e de controle. Usando suas vantagens, exigências complexas podem ser implementadas em sistemas de fácil manutenção e de baixo custo, com capacidade de raciocínio usando um número mínimo de regras. Isso pode ser alcançado com base na natureza interpolativa da teoria dos conjuntos fuzzy [26],[27].

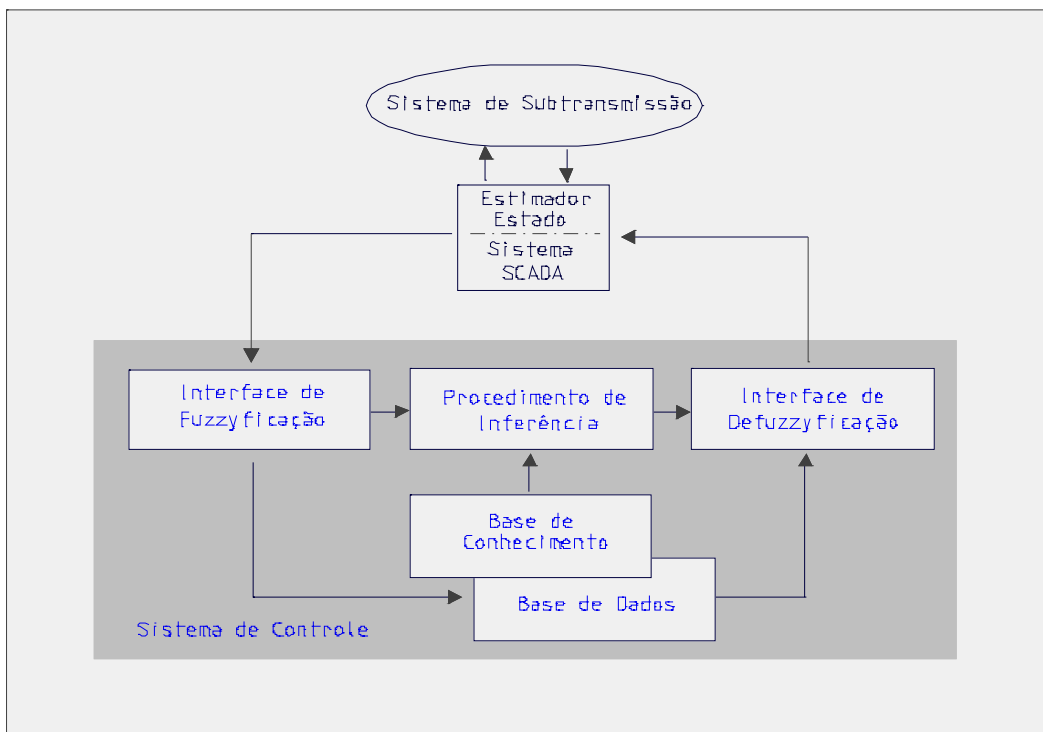


Figura 1.1 - Estrutura básica do Sistema de Controle.

c) Escopo da parceria com AUDIOLAB

A parceria com empresa AUDIOLAB está relacionada com o desenvolvimento do software (EMS), integração com as bibliotecas desenvolvidas pelas parcerias (PUC e UNICAMP) e das mesmas com sistema SCADA.

1.7. Importância da pesquisa e estado da arte

Como foi indicado anteriormente, a introdução dos sistemas SCADA na prática de operação de sistemas de potência abriu possibilidades para a transição para o controle em tempo-real de tensão e potência reativa. Deste modo, foi criado um caminho para a aplicação de abordagens (por exemplo [4],[5],[9],[28-31]) baseadas na programação não linear ou linear nos casos do uso de modelos completos ou simplificados, respectivamente, de regime permanente para resolver o problema em tempo-real. Porém, em geral, a transição para o controle usando estas abordagens não foi realizada, devido à natureza específica do problema e algumas deficiências [13] destas abordagens, o que limitam sua gama de aplicações. Além disso, a otimização do fluxo de potência na forma tradicional não fornece, em muitos casos, a correspondente adequação para o controle em tempo-real [12],[14]. Finalmente, algumas questões foram formuladas em [5], do ponto de vista prático (a falta de consideração da natureza discreta de algumas variáveis de controle, dificuldades de realização, abandono de conhecimentos e experiências, acumuladas em engenharia, que não podem ser refletidas com a estrutura dos modelos formais, etc.) demonstrando utilidades restritas das indicadas abordagens.

Do ponto de vista geral, a análise [32] mostra que, em 50% dos casos, os usuários não estão satisfeitos com os algoritmos convencionais dos programas instalados nos centros de controle de energia. Especialmente, foi delineada a falta de flexibilidade para adaptação de algoritmos convencionais para as necessidades específicas dos usuários, e a interface homem-máquina foi considerada insatisfatória.

Como já citamos anteriormente, em regra, o problema de controle de tensão e de potência reativa é resolvido por operadores experientes. Levando isso em consideração, é necessário indicar que o constante crescimento dos sistemas de potência, sua complexidade e as restrições predominantes produzem circunstâncias extremas para os operadores, que precisam corrigir o problema de tensão e de potência reativa em curtos intervalos de tempo [12]. Isso impõe decisões cada vez mais difíceis e complexas aos operadores, causando muita pressão sobre os mesmos [15]. Por outro lado, a experiência mostra que os operadores, para evitar tensão excessiva no processo de controle, preferem mover o modo de operação do sistema para longe do limite, diminuindo, por exemplo, a carga dos

geradores. Isso leva a um considerável desperdício de potência reativa disponível nos geradores. Assim, pelos diferentes pontos de vista, é necessário tornar mais fácil este tipo de atividade dos operadores, liberando-os ao máximo. Considerando isso, pesquisadores exploraram outras possibilidades.

Devido à quantidade limitada de informações que o homem pode receber e processar por unidade de tempo, o mesmo constitui um "elo frágil" na malha do controle automatizado de sistemas complexos (em particular, sistemas de potência). Para superar isso, é necessário desenvolver procedimentos que transmitam aos computadores as facilidades, inerentes ao homem de controlar sistemas complexos, de maneira que os mesmos resolvam os problemas de forma similar a um operador experiente. Os computadores devem demonstrar um tipo de inteligência que transcende algumas limitações típicas ao homem - que é, em primeiro lugar, a barreira da informação. Para esta meta, é possível usar um dos mais importantes representantes do campo da inteligência artificial - os sistemas especialistas baseados em conhecimento [26],[33].

A experiência no uso de computadores nos problemas de engenharia de potência, mostra que a aplicação de idéias de sistemas especialistas pode permitir que se comece a usar computadores, não somente como uma "calculadora de alta velocidade", mas como um meio de busca heurística e inferência lógica, com base na aquisição, representação e processamento de conhecimento [34].

É possível encontrar diversas motivações da racionalidade de implementação das técnicas de sistemas especialistas, adicionando-os a rigorosos modelos matemáticos e abordagens numéricas ou em certos casos, utilizando-as completamente em problemas de engenharia de potência. Por exemplo, em [12], o interesse na aplicação de sistemas especialistas está associado com casos nos quais as abordagens matemáticas exigem uma quantidade significativa de cálculos para aplicações em tempo real. Entretanto, generalizando [32], [35],[36], é possível formular um ponto de vista mais amplo. Em particular, as seguintes vantagens do uso de sistemas especialistas podem ser indicadas:

- Assistência às pessoas - especialistas;
- Flexibilidade;

- Entendimento;
- Rapidez.

Analisando trabalhos realizados no campo de aplicações de sistemas especialistas em engenharia de potência, é necessário ressaltar que a representação do conhecimento em todos os trabalhos (com exceção de um), considerados na resenha [36], foram baseados em sistemas de produção (com o uso de regras de produção SE-ENTÃO), o que é natural e justificado. Ao mesmo tempo, o número de trabalhos associados com o problema de controle de tensão e potência reativa, entre outros problemas nesse campo, é pequeno (estimado em 10% em [36] e somente 4,4% na mais recente resenha [37]). Em particular, é possível indicar artigos [14],[35],[38-40] baseados na combinação de tecnologia de sistemas especialistas, com técnicas numéricas.

Como um desenvolvimento natural de [14],[35],[38-40], é possível considerar os trabalhos [15],[41] que não compartilham todas as vantagens da aplicação de sistemas especialistas. Em particular, é indicado em [15],[41] que sistemas especialistas convencionais, processam principalmente procedimentos seqüenciais em um método de tentativa-e-erro, buscando uma coincidência no conjunto de regras para uma dada condição do sistema, a fim de selecionar um meio de operação. Para iniciar o uso das regras, é necessário que se tenha uma coincidência das condições pré-determinadas para uma dada entrada, resultando uma operação efetiva quando aplicada a uma situação prática de controle. Entretanto, uma descrição detalhada do conhecimento, normalmente resulta em uma formalização excessiva, dando origem a problemas, tais como: utilização flexível dos conhecimentos e consistência dos conhecimentos. Uma razão para isso, é que o conhecimento e a experiência humana são freqüentemente subjetivos e vagos, fazendo com que a representação do conhecimento nos sistemas especialistas convencionais, seja difícil de se realizar. Deste modo, os autores de [15],[41] introduziram um raciocínio aproximado para controle de tensão e potência reativa, baseado na teoria de conjuntos fuzzy [26],[27] que já possui amplas aplicações em problemas de engenharia de potência (por exemplo, resenhas [42],[43]).

Em [15],[41] é usado um modelo proposto por Takagi e Sugeno [44]. No correspondente raciocínio, heurísticas de controle são expressas pelas regras fuzzy, onde as premissas são

dadas pelas variáveis lingüísticas [26],[45], que medem a proximidade de uma dada entrada em satisfazer uma certa condição, com o nível de pertinência para um conjunto fuzzy. Esse raciocínio aproximado permite realizar a avaliação multi-atributo de uma entrada, que é análoga ao processo de tomada de decisões por um operador, considerando todos os atributos possíveis para uma ação efetiva.

Os autores de [15],[41], desenvolveram um protótipo de sistema de controle de tensão e potência reativa. Os resultados da simulação obtidos com o uso desse protótipo demonstram as vantagens da nova abordagem em relação aos sistemas especialistas convencionais.

A abordagem [15],[41] abriu uma importante e promissora direção na resolução do problema de controle de tensão e potência reativa. Entretanto, sua aplicação é limitada pelas seguintes considerações substanciais e técnicas [11],[24]:

- A abordagem é direcionada para resolver o problema com uma colocação simplificada, pois não considera o objetivo econômico (minimização das perdas) e nem as restrições nas capacidades de potência dos ramos do sistema (é necessário indicar que esta desvantagem é típica em todos os trabalhos, associados com o uso de metodologia de sistemas especialistas; uma exceção é o trabalho [14], onde uma tentativa foi feita para minimizar as perdas);
- A abordagem é baseada no uso de índices de sensibilidade para avaliação da eficiência da influência do uso dos dispositivos de regulação e compensação, nos níveis de tensão das barras do sistema [11],[24]. Entretanto, a técnica de definição dos índices de sensibilidade tem desvantagens que podem levar a erros consideráveis.
- As regras incluídas na base do conhecimento são gerais, aplicáveis a qualquer sistema de potência. Ao mesmo tempo, não são consideradas as questões de incorporação de outros tipos de regras, que devem ser "adaptadas" [16],[24] de acordo com a filosofia operacional de um concreto sistema de potência e seus objetivos formais e não formais;

- O modelo fuzzy de Takagi e Sugeno [44], usado para inferência fuzzy e defuzzyficação [26],[45], permite simplificar esses procedimentos. Entretanto, isso é alcançado ao custo da imposição de restrições no caráter das relações entre entradas e saídas das regras, limitando as possibilidades e a flexibilidade da abordagem;
- Um importante componente de controle fuzzy é a questão da qualidade dos modelos fuzzy (em particular, em índices de complexidade e adequação [46-48]) e sua correção (ajuste), permitindo a melhoria na eficiência do controle fuzzy. Entretanto, esta questão não é considerada;
- A disponibilidade de valores discretos de operação dos dispositivos de regulação (número de bancos de capacitores e posições dos taps dos transformadores) não permite o uso direto da abordagem, sem modificações.

Superando esses aspectos, a implementação da presente pesquisa, que é um desenvolvimento natural do trabalho [11], permitirá o uso da tecnologia fuzzy por completo, para resolução do problema de controle de tensão e potência reativa de forma abrangente.

1.8. Objetivos da dissertação

O objetivo geral do presente trabalho é melhorar a eficiência na resolução de um dos mais importantes problemas da engenharia de potência - o controle coordenado “on line” de tensão e potência reativa em ambientes regulamentado e desregulamentado, baseado em integração de abordagens tradicionais, numéricas e a tecnologia da teoria de conjuntos fuzzy (lógica fuzzy).

O melhoramento indicado acima está associado com estudos e análises comparativas dos procedimentos de lógica fuzzy, para o aumento da qualidade dos modelos fuzzy usados e soluções obtidas na sua base para regras típicas incluídas na base de conhecimento do sistema destinado ao controle de tensão e potência reativa.

A obtenção do objetivo geral está associada com a resolução das seguintes etapas:

- Análise das regras, incluídas na base de conhecimento e destinadas ao controle de tensão e potência reativa em ambientes regulamentados e desregulamentados, incluindo regras adaptadas para condições de controle no sistema de subtransmissão da CEMIG para diferentes níveis de hierarquia situacional de controle;
- Desenvolvimento de um software *experimental* para estudos e análise dos diversos procedimentos de lógica fuzzy;
- Análise da qualidade dos modelos fuzzy:
 - Análise comparativa dos diferentes esquemas principais de inferência fuzzy do ponto de vista de sua eficiência;
 - Comparação de diferentes esquemas de defuzzyficação (pelo menos os principais);
 - Análise da qualidade do modelo fuzzy em relação a sua adequação e complexidade.

CAPÍTULO 2

TECNOLOGIA FUZZY EM CONTROLE DE TENSÃO E POTÊNCIA REATIVA

2.1. Considerações gerais

Os fundamentos da teoria dos conjuntos fuzzy foram criados por Lotfi A. Zadeh, professor da Universidade da Califórnia, em Berkeley. Os primeiros resultados foram gerados pela solução dos problemas de classificações de conjuntos que não possuíam fronteiras bem definidas (ou seja, a transição entre conjuntos era suave e não abrupta). É importante, porém, ressaltar que no decurso da ciência outros pesquisadores demonstraram seu desconforto com relação à lógica binária por ela ser bivalente, ou seja, reconhecer apenas dois valores: verdadeiro ou falso. Foi relatando sua fragilidade para lidar com situações mais realistas que surgiu a necessidade de se desenvolver uma teoria que tratasse de termos vagos ou imprecisos, que mais se aproximasse da operação das atividades humanas. Procurando superar esses momentos, Zadeh publicou em 1965 o trabalho [49], revolucionando o assunto com a criação de sistemas fuzzy.

Como um desenvolvimento natural dos primeiros resultados na área da teoria e prática de sistemas fuzzy, é necessário considerar as pesquisas do E.H. Mamdani, professor da Universidade de Londres. Em 1974, após inúmeras tentativas frustradas em controlar uma máquina a vapor com tipos distintos de controladores, ele somente conseguiu fazê-lo através da aplicação do raciocínio fuzzy [50]. Esse sucesso serviu de alavanca para outras aplicações, por exemplo [51],[52].

Os resultados das pesquisas mais recentes, por exemplo [51],[53] permitem afirmar que técnicas de controle baseadas em lógica fuzzy (nebuloso) devem ser consideradas como uma das mais importantes aplicações da teoria dos conjuntos nebulosos.

Controle fuzzy faz referência primeiramente a controle de processos através de descrições lingüísticas, usando as regras if / then [26]. A base dos controladores fuzzy é o fato das descrições lingüísticas prescreverem as ações apropriadas para um dado estado [26],[53]. As descrições lingüísticas envolvem associações com variáveis lingüísticas (serão vistas na seção 2.3) e procedimentos de inferência (serão vistos no capítulo 3).

Em linhas gerais, um controlador fuzzy pode ser visto como a seqüência de decisões do projetista, na seguinte forma [27],[53]:

entrada → fuzzyficação → regras → avaliação de regras → agregação →
defuzzyficação → saída.

De fato, os dispositivos de medida inserem no processo de controle fuzzy uma medida crisp, a qual é submetida a uma adequação ao intervalo das variáveis de base (normalização, etc) e é imediatamente fuzzyficada de acordo com as funções de pertinência estabelecidas para o processo, em seguida estas medidas já fuzzyficadas são levadas ao processo de inferência onde são comparadas com as regras da base de conhecimento e valores fuzzy são inferidos nesta fase. Estes valores fuzzy resultantes do processo de inferência são submetidos ao processo de defuzzyficação, onde através do método escolhido para tal, teremos um valor crisp que representa a saída do controlador fuzzy e servirá como uma nova entrada para o processo o qual está sendo controlado.

Existem vários tipos de controladores fuzzy, sendo o controlador de Mamdani o mais utilizado [26],[27],[45],[54-56].

O método de Mamdani é um tipo de inferência onde os conjuntos fuzzy do conseqüente de cada regra são combinados através de operadores de agregação. Já o conjunto fuzzy resultante é "defuzzyficado" para levar à saída crisp do problema. A característica principal do controlador de Mamdani é descrever o estado de processos através de variáveis lingüísticas. Estas variáveis são utilizadas como entradas das regras de controle. As variáveis lingüísticas, juntamente com as regras, constituem a principal etapa do projeto de um controlador de Mamdani [26]. A cada variável lingüística corresponde uma série de conjuntos fuzzy denominados "termos lingüísticos", que descrevem os diversos estados das

variáveis lingüísticas e que possuem formas variadas. As formas mais populares são a trapezoidal e a triangular [51]. A essência do método pode ser descrita em três estágios:

- determinação do grau de pertinência ($\mu(u)$) da entrada na regra antecedente;
- cálculo das regras conseqüentes;
- agregação das regras conseqüentes no conjunto fuzzy, “ação de controle”.

O método de Mamdani leva em conta todas as regras em um único estágio. Nele, não ocorrem encadeamentos (*chaining*), o que leva o processo de inferência em controle fuzzy a ser mais simples que em vários sistemas especialistas. Na literatura, é possível encontrar muitas modificações do controlador original de Mamdani.

Controladores fuzzy são muito simples na sua essência, pois consistem basicamente de um estágio de entrada, um estágio de processamento e um estágio de saída. O estágio de entrada mapeia sensores ou outros tipos de entradas (por exemplo, níveis de tensão ou cargas medidas) de maneira apropriada as funções consecutivas e valores verdadeiros; o estágio de processamento invoca cada regra adequada e gera um resultado para cada uma delas e então combinam os resultados destas regras; e finalmente o estágio de saída converte o resultado combinado no estágio anterior para dentro do controle [27],[53],[54].

Controladores fuzzy baseados em regras tem um grande número de vantagens práticas, que são discutidas nos trabalhos [27],[53-56].

2.2. Lógica fuzzy em problemas de sistemas elétricos de potência

A aplicação da teoria de conjuntos fuzzy em sistemas de potência é relativamente, uma nova e promissora área de pesquisa [42],[43],[57],[58].

Conceitos da teoria dos conjuntos fuzzy foram introduzidos na solução de problemas de potência no final dos anos 70, mais especificamente em problemas de tomada de decisão [57],[58]. Porém, o substancial interesse em aplicações para a área de sistemas de potência é relativamente recente. Enquanto métodos de soluções analíticas convencionais existem

para muitos problemas de planejamento, operação e controle dos sistemas de potência, sua formulação para problemas do mundo real sofre restrições. Além disso, muitas incertezas existem em um número significativo de problemas devido aos sistemas de potências serem complexos, distribuídos geograficamente e influenciados por eventos inesperados. Estes fatores trazem dificuldades para lidar com diversos problemas desta área, utilizando-se das abordagens convencionais por si só. Sem contar que a área de inteligência artificial (computacional) para a área de sistemas de potência tem crescido muito nos últimos anos complementando assim, a matemática convencional e obtendo, juntas, excelentes resultados [58].

2.3. Variáveis lingüísticas e regras fuzzy de produção

O conceito de variáveis lingüísticas foi introduzido por Zadeh no trabalho [59], onde definiu variável lingüística como sendo aquela variável cujos valores são números fuzzy, também chamados de valores fuzzy ou valores lingüísticos. Elas podem assumir valores que consistem de palavras ou sentenças em uma linguagem [45].

Uma ilustração interessante sobre variável lingüística é mostrada no trabalho [27] da seguinte maneira: Uma variável lingüística u , no universo de discurso U que é definida em um conjunto de termos (ou terminologia), nomes ou rótulos, $T(u)$, com cada valor sendo um número fuzzy definido no universo de discurso U , é representada, por exemplo, se u for temperatura do transformador, então seu conjunto de termos $T(u)$, poderia ser:

$$T(\text{temperatura do transformador}) = \{\text{baixa, média, alta}\}.$$

Sobre o universo de discurso $U = [0, 100]$. Onde baixa, média e alta são os valores fuzzy ou termos de variáveis lingüísticas da grandeza *temperatura do transformador* [27].

Uma pessoa que esteja numa função de operação do sistema elétrico, por exemplo, não precisa de um valor exato definido para a variável temperatura do transformador. Tal operador consegue classificar a informação de temperatura do transformador em conjuntos fuzzy, tipo: BAIXA, MÉDIA, ALTA. Estes conjuntos representam valores “fuzzyficados” dos valores exatos de temperatura do transformador. Em seguida, o operador formula e

executa uma estratégia de controle baseada na compreensão de cada variável de entrada e de saída, o fluxo de dados no cérebro fica reduzido a apenas ao que é necessário para se executar a tarefa requerida com a precisão e resoluções necessárias; assim o operador humano processa as quantidades fuzzy, chegando a uma variável fuzzy com sua ação de controle. O ser humano naturalmente trabalha com características incertas embora as máquinas, equipamentos e controles precisam de um número crisp que represente o valor de referência necessário. Dessa maneira, é necessário um processo de conversão de números reais de entrada em valores fuzzy e posteriormente a conversão de valores fuzzy, resultante da saída de inferência, em números reais. Mais detalhes sobre esse processo serão mostrados posteriormente [27].

No nosso estudo temos regras gerais, analisadas abaixo, que refletem estratégias gerais de controle [11],[60],[61] cada uma delas é apresentada por um conjunto de regras concretas definidas por valores fuzzy [53], (termos [26],[27]) de variáveis lingüísticas. Essas regras incluem as seguintes variáveis lingüísticas: *eficiência de controle*, *margem adequada* e *incremento de perdas* como sendo as variáveis de entrada e *intensidade de utilização* como sendo a variável de saída (é natural, que a consideração de condições adicionais, associadas, por exemplo, com a política operacional do sistema de potência pode demandar a consideração também de outras variáveis lingüísticas).

Como foi indicado anteriormente na análise de literatura, esta abordagem [15],[16] fornece um controle corretivo (associado somente com as violações das restrições nos níveis de tensão das barras do sistema), e está baseada na utilização de regras fuzzy de produção do seguinte tipo:

- | | | |
|-----|-------|--|
| (I) | SE | tensão da barra viola o limite operacional |
| | E | um dispositivo está disponível para controle efetivo da tensão, com a variação de sua saída |
| | E | existe margem adequada para a saída deste dispositivo para eliminar a violação da restrição no nível de tensão |
| | ENTÃO | aumente (diminua) a intensidade da saída desse dispositivo |

Ao mesmo tempo, a experiência [60],[62],[63] mostra que soluções mais abrangentes e flexíveis, que permitam cobrir todos os níveis de hierarquia situacional, indicadas acima, podem ser obtidas, se a base de conhecimentos incluir regras gerais do seguinte tipo:

- | | | |
|------|-------|--|
| (II) | SE | tensão da barra viola o limite operacional |
| | E | um dispositivo está disponível para controle efetivo da tensão, com a variação de sua saída |
| | E | existe margem adequada para a saída deste dispositivo para eliminar a violação da restrição no nível de tensão |
| | E | o dispositivo está disponível para a redução (incremento) das perdas |
| | ENTÃO | aumente (diminua) a intensidade da saída desse dispositivo |

É natural, que da mesma forma como são construídas as regras para as violações das restrições nos níveis de tensão das barras, é possível construí-las para as violações nas capacidades de potência dos elementos das redes.

É necessário indicar, que outros tipos de condições (minimização das mudanças nas ações de controle, o que corresponde ao princípio do desvio mínimo, minimização das ações de controle modificadas [31], maximização da reserva de potência reativa [14], número aceitável de comutações para um determinado equipamento em um dado intervalo de tempo, estado dos dispositivos de regulação e compensação, etc.), que refletem a política operacional do sistema de potência e podem influenciar na possibilidade ou racionalidade de uso de um ou outro dispositivo de regulação ou compensação, podem ser refletidas através da inserção de outros tipos de regras e/ou adaptação das funções de pertinência dos valores fuzzy das variáveis lingüísticas correspondentes usadas nas premissas [60] das regras gerais do tipo (I) ou do tipo (II).

Como exemplo, na *Figura 2.1*, é ilustrada a noção dos valores fuzzy da variável lingüística *intensidade de utilização* de acordo com [11],[26],[53].

Nessa figura, temos a variável lingüística *intensidade de utilização*, cujos valores fuzzy, são três (pequena, média e grande). Na figura é mostrado também os níveis de pertinência de cada um dos três valores fuzzy.

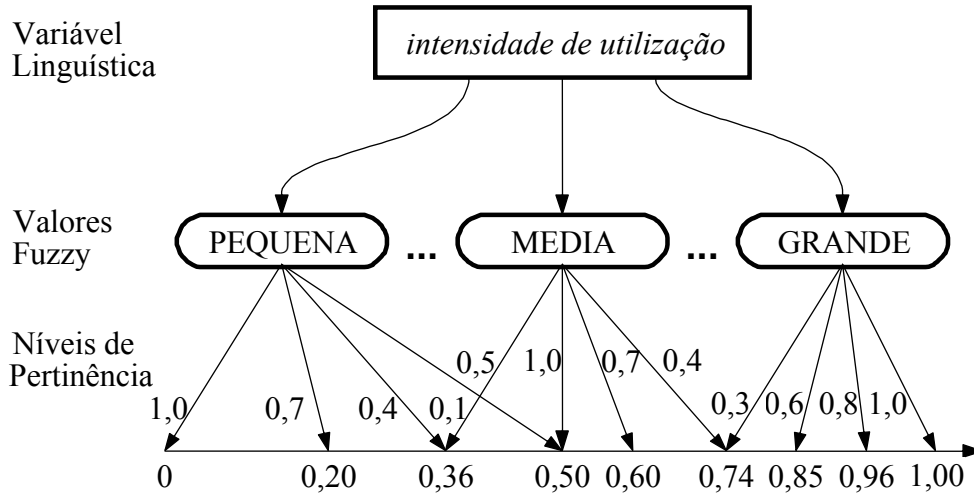


Figura 2.1 – Valores fuzzy.

O primeiro passo para a construção da descrição lingüística está associado com a determinação dos intervalos de definição das variáveis de base das variáveis lingüísticas [26],[53]. A determinação desses intervalos para as variáveis lingüísticas: *intensidade de utilização*, *eficiência de controle* e *incremento de perdas* não apresentam dificuldades. Em particular, a variável lingüística *intensidade de utilização* possui o intervalo único para a sua variável de base para refletir o grau de utilização da capacidade disponível do dispositivo *j*.

$$u_j = \bar{x}_j - x_j^e \quad (2.1)$$

no caso de aumento da saída do dispositivo *j*

$$u_j = x_j^e - \underline{x}_j \quad (2.2)$$

no caso de sua diminuição do correspondente dispositivo *j*.

A variável de base para variável lingüística *eficiência de controle* e *incremento de perdas*, são obtidas através dos coeficientes de sensibilidade de tensão e coeficientes de sensibilidade de perdas respectivamente, os quais são, posteriormente, adequados ao intervalo de 0 a 1.

Para obtenção da variável de base para a variável lingüística *margem adequada* é necessário avaliar os limites físicos *do equipamento* de controle (dispositivo) *j*, o qual nos permitirá conhecer o grau de utilização da capacidade disponível do mesmo.

A técnica para obtenção dos coeficientes de sensibilidade de tensão e perdas e a forma de obtenção da variável lingüística *margem adequada*, sem aprofundarmos muito, serão mostradas na seção 2.5, para que em seguida possamos dar continuidade aos detalhes dos termos lingüísticos.

2.4. Adaptações das regras da base de conhecimento

É natural a necessidade de incorporações de outros tipos de regras na base de conhecimento que devem ser “adaptadas” de acordo com a filosofia operacional de um concreto sistema de potência e seus objetivos formais e não formais.

Da mesma forma como são construídas as regras para as violações das restrições nos níveis de tensão das barras, é possível construí-las para as violações nas capacidades de potência dos elementos da rede, além disto é importante indicar que outros tipos de condições [31] que refletem a política operacional do sistema de potência e podem influenciar na possibilidade ou racionalidade do uso de um ou outro dispositivo de regulação ou compensação, devem ser avaliadas como:

- minimização das mudanças nas ações de controle, o que corresponde ao princípio do desvio mínimo,
- minimização das ações de controle modificadas,
- maximização das reservas de potência reativa,
- número aceitável de comutações para um determinado equipamento em um dado intervalo de tempo,
- estado dos dispositivos de regulação ou compensação,
- hierarquização das barras controladas,
- minimização dos efeitos negativos gerados sobre as demais barras, devido ao controle efetuado,
- entre outras...

Exemplo de adaptações das regras que podem ser inseridas na base de conhecimento:

(III)	SE	tensão da barra viola o limite operacional
	E	um dispositivo está disponível para controle efetivo da tensão, com a variação de sua saída
	E	existe margem adequada para a saída deste dispositivo para eliminar a violação da restrição no nível de tensão
	E	o dispositivo está disponível para a redução (incremento) das perdas
	E	limite de comutações para o período não foi atingido
	E	número de comutações do dispositivo durante o período determinado não é alto
	E	escolha deste dispositivo não provoca impactos em outras barras
	ENTÃO	aumente (diminua) a intensidade da saída desse dispositivo

2.5. Construção dos coeficientes de sensibilidade

A avaliação de uma ação de controle resultante da operação de um dispositivo (compensação ou regulação) j , sobre uma mudança de tensão na barra i está associada com a utilização do coeficiente de sensibilidade S_{ij} . Em um sistema com I barras controladas e J dispositivos de compensação ou regulação, será necessário obter a matriz de sensibilidade de tensão $[S_{ij}^V]$, $i=1, \dots, I, j=1, \dots, J$.

As matrizes de sensibilidade de tensão $[S_{ij}^V]$ podem ser construídas por métodos baseados no “fluxo de carga desacoplado rápido” [64], entretanto a deficiente precisão de linearização [41] no uso desta abordagem, permite usá-la somente quando as perturbações são pequenas. Ao mesmo tempo, a experiência [65],[66] mostra que usando a técnica de planejamento de experimentos [67],[68] nos problemas de engenharia de potência, permite a construção de modelos, em particular, lineares, suficientemente adequados, de uma maneira racional.

O objetivo do planejamento de experimentos fatorial é organizar experimentos (com um objeto real, sistema ou seus modelos) de maneira a maximizar o montante de informações obtidas com um número mínimo de experimentos, enquanto se processa uma análise estatística dos resultados obtidos [69].

A técnica de planejamento de experimentos fatorial é baseada na variação de fatores em um número limitado de níveis. Em particular, um experimento fatorial completo é associado com a realização de ensaios para todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores. É comum a utilização do experimento fatorial completo, variando-se os fatores em dois níveis, o que demanda a realização de $N = 2^J$ experimentos e permite a construção de modelos lineares do tipo:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^J b_j x_j + \sum_{j < q} b_{jq} x_j x_q + \sum_{j < q < r} b_{jqr} x_j x_q x_r + \dots \quad (2.3)$$

A matriz para o planejamento fatorial completo com três fatores é mostrada na *Tabela 2.1*. O plano dos experimentos é definido pelos fatores x_1, x_2 e x_3 . A coluna que contém o x_0 , é introduzida para determinar o termo constante de (2.3). O produto dos fatores na *Tabela 2.1* é definido como resultado da multiplicação dos correspondentes fatores de cada linha da matriz.

Tabela 2.1 – Matriz para o planejamento 2^3 .

Número do Ensaio	Fatores				Produtos dos Fatores				y
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_8

Utilizando-se os fatores normalizados, é possível construir o modelo:

$$y = \tilde{b}_0 + \sum_{j=1}^J \tilde{b}_j \tilde{x}_j + \sum_{j<q}^J \tilde{b}_{jq} \tilde{x}_j \tilde{x}_q + \sum_{j<q<r}^J \tilde{b}_{jqr} \tilde{x}_j \tilde{x}_q \tilde{x}_r + \dots \quad (2.4)$$

Considerando que $2^J > J + 1$, os dados obtidos com o experimento completo possuem certa redundância de informação, sendo assim, é possível construir modelos lineares

$$y = \tilde{b}_p + \sum_{j=1}^J \tilde{b}_j \tilde{x}_j \quad (2.5)$$

com base no chamado experimento fatorial fracional [60],[62],[67],[68].

As matrizes dos experimentos fracionais são partes das correspondentes matrizes de experimentos completos, e o número de ensaios que precisa ser realizado é menor que o número de pontos do espaço fatorial.

As matrizes do planejamento fracional podem ser obtidas com a redução do número de ensaios em duas, quatro ou mais vezes com a substituição de interações com efeitos insignificantes por novos. O número de substituições (g) define o 2^{J-g} planejamento experimental.

De tal forma, usando a técnica de planejamento de experimentos fracionais, é possível substituir a interação com efeito insignificante (por exemplo, $x_1x_3=x_4$, $x_2x_3=x_5$ e $x_1x_2x_3=x_6$ na Tabela 2.1), por um novo dispositivo j .

Se tenho J dispositivos de regulação ou compensação, teria que realizar 2^J experimentos, porem estabeleço g substituições (substituições de interações com efeitos insignificantes por novos fatores, como por exemplo as que tomamos anteriormente $x_1x_3=x_4$, $x_2x_3=x_5$ e $x_1x_2x_3=x_6$). Assim podemos definir o numero de experimentos igual a 2^{J-g} .

De tal forma, se temos, por exemplo, 3 dispositivos, teríamos que realizar 2^3 experimentos, ou seja, 8 experimentos, porem se queremos acrescentar mais um dispositivo, podemos evitar ter que fazer 16 experimentos, fazendo a substituição de uma

interação insignificante por este novo dispositivo que queremos acrescentar, mantendo o número de experimentos igual a 8 e não igual a 16 como seria se fossem 2^4 .

Para a escolha da interação com efeitos mais insignificantes, a experiência nos mostra que quanto maior for o número de variáveis combinadas numa mesma combinação entre as ações de controle, aquela que tiver maior número de variáveis combinadas será a mais insignificante ($x_1x_2x_3$, por exemplo), portanto pode-se substituir esta combinação por um novo dispositivo e assim sucessivamente, com o objetivo de minimizar o número de experimentos na utilização da técnica de planejamento de experimentos fracionais.[11],[60].

Para a construção dos índices de sensibilidade para tensão e perdas, foram realizados experimentos utilizando-se o software para análise de fluxo de carga, PSS/E (Power System Simulator for Engineering), utilizado pela CEMIG.

Para a construção do modelo e conseqüentemente dos coeficientes de sensibilidade, os quais servirão como variável de base para as variáveis lingüísticas em estudo, utilizaremos um caso da região Metropolitana de Belo Horizonte (Centro)-CEMIG (*Figura 2.2*). Os experimentos foram realizados utilizando-se o software para análise de fluxo de carga PSS/E, o qual servirá de base para todos os experimentos e conseqüentemente a avaliação dos procedimentos de lógica fuzzy.

Todos os pontos de controle utilizados neste estudo são reais (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 , e x_6), dos quais x_1 e x_2 são geradores, x_3 são compensador síncrono e banco de capacitores (funcionam como gerador), x_4 é transformador (LTC), x_5 são transformador (LTC) e compensador síncrono, funcionam como gerador e finalmente x_6 são transformador e banco de capacitores.

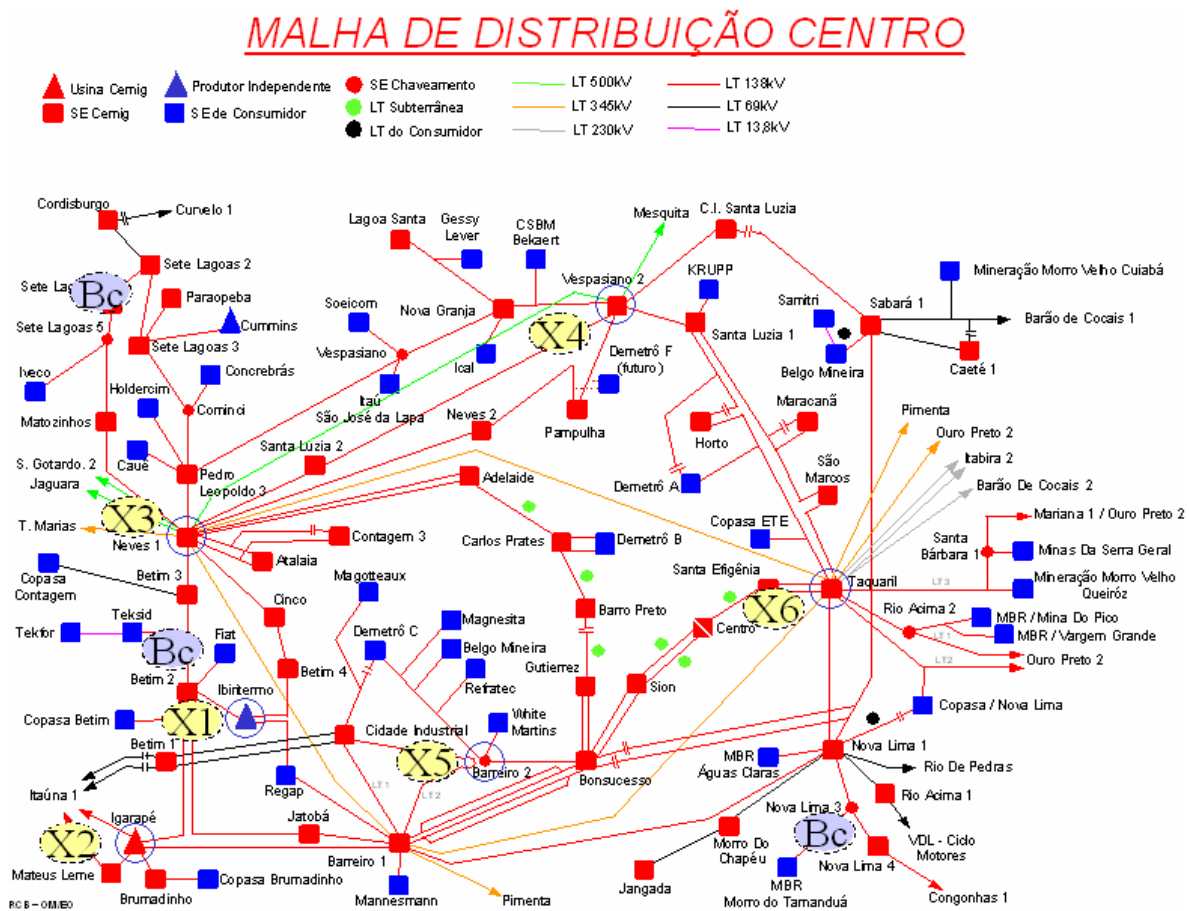


Figura 2.2 – Malha de distribuição da região Metropolitana de Belo Horizonte (Centro).

Barras controladas do caso (Bc):

- B. FIAT-138 (964),
- B. SETE LAGOAS-138 (900),
- B. NOVA LIMA-4-138 (1548).

Barras de controle do caso:

- B. UT-IBIRITERMO – 18 (1513) – (x_1) ,
- B. IGARAPE-1MQ (1500) - (x_2) ,
- B. NEVES-SIN1 (355) – (x_3) ,
- B. VESPASIANO 2-138 (4027) - (x_4) ,
- B. BARREIRO-138 (314) – (x_5) ,
- B. TAQUARIL-138 (376) – (x_6) .

Tensão nas barras controladas, para o caso base:

FIAT-138 (964): 0,98590 (p.u.),

SETE LAGOAS-138 (900): 0,96690 (p.u.),

NOVA LIMA-4 - 138 (1548): 0,98650 (p.u.),

PERDAS TOTAIS para o caso base: 33,9 (MW).

Tabela 2.2 – Dados dos fatores calculados de acordo com os percentuais de variação sobre a tensão dos dispositivos j no caso base.

Barra	Fatores (j)	x_j^0	Δx_j	x_j^-	x_j^+
1513	x_1 [p.u.]	0,98000	0,02450	0,95550	1,00450
1500	x_2 [p.u.]	0,98100	0,02453	0,95648	1,00553
355	x_3 [p.u.]	0,97940	0,02449	0,95492	1,00389
4027	x_4 [tap]	1,13000	0,01695	1,11305	1,14695
314	x_5 [tap]	0,97000	0,01455	0,95545	0,98455
376	x_6 [tap]	1,02000	0,01530	1,00470	1,03530

Na Tabela 2.2, $x_j, j=1, \dots, 6$ são os fatores (pontos de controle), $x_j^0, j=1, \dots, 6$ são os valores de tensão para o caso base; $\Delta x_j, j=1, \dots, 6$ são variações aplicando o percentual em questão sobre x_j^0 (foram aceitos $\pm 2,5\%$ para geradores e $\pm 1,5\%$ para transformadores).

Os fatores podem assumir um mínimo x_j^- , e um máximo x_j^+ ($x_j^- \leq x_j \leq x_j^+, j = 1, \dots, J$) e são apresentados na forma normalizada:

$$\tilde{x}_j = \frac{x_j - x_j^0}{\Delta x_j}, j = 1, \dots, J. \quad (2.6)$$

onde:

$$x_j^0 = 0,5(x_j^- + x_j^+) \text{ e } \Delta x_j = 0,5(x_j^+ - x_j^-).$$

É natural que x_j^- corresponda a -1 e x_j^+ corresponda a $+1$ para \tilde{x}_j . A utilização dos fatores na forma normalizada simplifica os procedimentos para a determinação dos coeficientes do modelo e sua análise estatística.

Tabela 2.3 – Dados obtidos através dos experimentos no PSS/E, baseados nas variações da Tabela 2.2.

Nº experimentos (n)	Tensão nas barras controladas (p.u.)			Perdas Totais (MW)
	y_n			
	964	900	1548	
1	0,97290	0,94680	0,97570	34,9
2	0,98970	0,96690	0,99140	33,0
3	0,97410	0,95020	0,98170	35,0
4	0,98910	0,97020	0,98340	33,2
5	0,97660	0,97180	0,98360	34,1
6	0,98660	0,97090	0,98320	34,7
7	0,99280	0,97900	0,98880	33,7
8	1,00450	0,97810	1,00250	34,2

Obs: Os dados da Tabela 2.3 são relativos aos valores de tensão e perdas totais observados nas barras controladas, ao aplicarmos no PSS/E, as variações baseadas nas Tabelas 2.1 e 2.2.

2.5.1. Elaboração do modelo com base em experimentos computacionais

Partindo da correlação (2.5), efetuaremos o cálculo dos coeficientes ($\tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \tilde{b}_3, \tilde{b}_4, \tilde{b}_5$ e \tilde{b}_6) do modelo para tensão:

Estes cálculos são efetuados baseando-se na média aritmética dos valores das colunas da Tabela 2.3, porém considerando os sinais das colunas da Tabela 2.1, para seus respectivos dispositivos. Como um exemplo, consideramos a tensão na barra controlada $i=964$. Levando em conta os sinais das colunas da Tabela 2.1, é possível obter, por exemplo, para x_1 :

$$\tilde{b}_1 = (-0,97290 + 0,98970 - 0,97410 + 0,98910 - 0,97660 + 0,98660 - 0,99280 + 1,004500)/8 = 0,006688.$$

Na mesma maneira, podem ser obtidos coeficientes ($\tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \tilde{b}_3, \tilde{b}_4, \tilde{b}_5$ e \tilde{b}_6) para todos os fatores. Esses coeficientes são apresentados na Tabela 2.4. A Tabela 2.4 inclui também os coeficientes do modelo para perdas do sistema.

Tabela 2.4 - Coeficientes (normalizados) dos modelos, para tensão e perdas.

Barras (964)	\tilde{b}_0	\tilde{b}_1	\tilde{b}_2	\tilde{b}_3	\tilde{b}_4	\tilde{b}_5	\tilde{b}_6
tensão	0,985788	0,006688	0,004338	0,004338	-0,001263	0,004188	0,000438
perdas	34,100000	-0,325000	-0,075000	0,075000	0,600000	-0,150000	-0,025000

Assim, é possível construir as seguintes modelos para tensão na barra controlada e para as perdas do sistema:

$$y_{t(964)} = 0,985788 + 0,006688 \tilde{x}_1 + 0,004338 \tilde{x}_2 + 0,004338 \tilde{x}_3 - 0,001263 \tilde{x}_4 + 0,004188 \tilde{x}_5 + 0,000438 \tilde{x}_6. \quad (2.7)$$

$$y_{(perdas)} = 34,100000 - 0,325000 \tilde{x}_1 - 0,075000 \tilde{x}_2 + 0,075000 \tilde{x}_3 + 0,600000 \tilde{x}_4 - 0,150000 \tilde{x}_5 - 0,025000 \tilde{x}_6. \quad (2.8)$$

2.5.2. Análise estatística dos resultados dos experimentos

A análise estatística dos resultados dos experimentos, nos permite verificar quais os coeficientes obtidos na equação de regressão linear são insignificantes de forma a serem expurgados, reduzindo assim o modelo [68].

Uma técnica tradicional para avaliação dos resultados dos experimentos, inclui os seguintes estágios:

- Verificação da homogeneidade das dispersões,
- Verificação da significância dos coeficientes do modelo,
- Verificação da adequação do modelo.

Porém, os estágios citados acima são comuns se os experimentos estão associados com um objeto ou sistema real (quando é possível realizar experimentos paralelos nos pontos de um espaço fatorial, definido por cada linha da matriz de experimentos). Se nos referimos a experimentos computacionais com o modelo, temos um significativo impacto na análise estatística dos resultados. Primeiramente, a impossibilidade de realizarmos experimentos paralelos, leva-nos a estimar a dispersão de y em zero em todos os pontos e, portanto, a verificação da homogeneidade das dispersões não faz nenhum sentido. Além disso, a

verificação da significância dos coeficientes do modelo, e a verificação da adequação do mesmo, utilizam o conceito de dispersão de reprodutibilidade ($D(y)_{rep}$) [67],[68],[70] associado com as dispersões de y em todos os pontos do espaço fatorial.

Considerando o exposto, assumiremos ter o seguinte modelo:

$$y = \tilde{b}_0 + \sum_{j=1}^J \tilde{b}_j \tilde{x}_j + \sum_{j<q} \tilde{b}_{jq} \tilde{x}_j \tilde{x}_q . \quad (2.9)$$

Levando em conta que $\tilde{x}_j, j=1, \dots, J$ podem ser assumidas [71] como variáveis randômicas centrais com $E(\tilde{x}_j) = 0$, nós temos $E(y) = \tilde{b}_0$ e $D(y) = E\{[y - E(y)]^2\}$. Se $\tilde{x}_j, j=1, \dots, J$ são independentes, então:

$$D(y) = D(\tilde{b}_0) + \sum_{j=1}^J [\tilde{b}_j^2 + D(\tilde{b}_j)] D(\tilde{x}_j) + \sum_{j<q} [\tilde{b}_{jq}^2 + D(\tilde{b}_{jq})] D(\tilde{x}_j) D(\tilde{x}_q), \quad (2.10)$$

onde a dispersão da variável normalizada $D(\tilde{x}_j)$ pode ser definida com base na dispersão

da variável x_j como $D(\tilde{x}_j) = \frac{D(x_j)}{\Delta x_j^2}, j=1, \dots, J$.

Se $D(y)$ é definida somente pelas dispersões das variáveis randômicas (as dispersões dos coeficientes são pequenas), então de (2.10) é possível obter

$$D(y) = \sum_{j=1}^J \tilde{b}_j^2 D(\tilde{x}_j) + \sum_{j<q} \tilde{b}_{jq}^2 D(\tilde{x}_j) D(\tilde{x}_q). \quad (2.11)$$

Se $x_j, j=1, \dots, J$ são normalmente distribuídas nos limites $x_j^0 \pm \Delta x_j$, então $x_j, j=1, \dots, J$ são distribuídos nos limites 0 ± 1 . Por isso, de acordo com a regra de três padrões, é possível escrever $E(\tilde{x}_j) \pm 3\sqrt{D(\tilde{x}_p)} = 0 \pm 3\sqrt{D(\tilde{x}_p)}$ e definir aproximadamente $D(\tilde{x}_p) \approx 0,11$.

Então, com base em (2.11) temos:

$$D(y) = 0.11 \left(\sum_{j=1}^J \tilde{b}_i^2 + 0.11 \sum_{j<q} \tilde{b}_{jq}^2 \right). \quad (2.12)$$

O segundo componente de (2.12) [71] é consideravelmente menor que o primeiro. Podemos então escrever a dispersão de reprodutibilidade como:

$$D(y)_{rep} = 0.11 \sum_{j=1}^J \tilde{b}_j^2 . \quad (2.13)$$

Usando (2.13), com base na condição de [68], temos a equação (2.14)

$$|\tilde{b}_j| > t \sqrt{\frac{D(y)_{rep}}{N}} , \quad (2.14)$$

é possível verificar a significância dos coeficientes do modelo. Em (2.14), t é o valor do critério de Student (distribuição de Student) [72],[73] definido sob $N =$ número de experimentos realizados e $f = N - 1$ graus de liberdade.

Para estimar a adequação do modelo depois da desconsideração dos fatores insignificantes, é possível utilizar o critério de Fischer (F_{cr})[72],

$$F = \frac{D(y)_{ad}}{D(y)_{rep}} < F_{cr} . \quad (2.15)$$

definido sob $f_{ad} = N - d$ e $f_{rep} = d - 1$ graus de liberdade (d é o número de coeficientes significantes do modelo).

Em (2.15), $D(y)_{ad}$ é a dispersão de adequação, a qual é estimada da seguinte maneira:

$$D(y)_{ad} = \frac{1}{N - d} \sum_{n=1}^N (y_n - \hat{y}_n)^2 . \quad (2.16)$$

onde:

\hat{y}_n é calculado com base no modelo (2.3) para as condições definidas pela n -ésima linha da correspondente matriz de planejamento (seu cálculo será mostrado posteriormente).

A seguir mostraremos como é avaliado a questão da significância dos coeficientes dos modelos (2.7) e (2.8) e posteriormente a estimação da adequação dos mesmos.

2.5.2.1. Verificação da significância dos coeficientes do modelo

Com base na equação (2.13), é possível calcular a dispersão de reprodutibilidade para os modelos (2.7) e (2.8). Por exemplo, para o modelo (2.7) temos:

$$D(y)_{rep(964)} = (0,11).(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2 + b_5^2 + b_6^2) = (0,11) [(0,006688)^2 + (0,004338)^2 + (0,004338)^2 + (-0,001263)^2 + (0,004188)^2 + (0,000438)^2] = 0,0000111838. \quad (2.17)$$

Para $q = 0,05$, $N = 8$ e grau de liberdade $f = N-1 = 8-1=7$, obtemos $t = 2,306$, utilizaremos da equação (2.14) para calcularmos a relação:

$$2,306 \sqrt{\frac{0,0000111838}{8}} = 0,002726522. \quad (2.18)$$

a qual nos permite considerar os coeficientes como significantes se $|\tilde{b}_j| \geq 0,002726522$.

Levando isso em consideração, é possível concluir que coeficientes \tilde{b}_1 , \tilde{b}_2 , \tilde{b}_3 e \tilde{b}_5 devem ser considerados como significantes. Formalmente, os coeficientes \tilde{b}_4 e \tilde{b}_6 devem ser considerados como insignificantes. Entretanto, levando em consideração que o coeficiente \tilde{b}_4 está próximo da fronteira de significância, consideraremos o mesmo como significativo. Assim, o modelo para tensão para a barra $i = 964$ é o seguinte:

$$y_{i(964)} = 0,985788 + 0,006688 \tilde{x}_1 + 0,004338 \tilde{x}_2 + 0,004338 \tilde{x}_3 - 0,001263 \tilde{x}_4 + 0,004188 \tilde{x}_5. \quad (2.19)$$

Para perdas $D(y)_{rep(perdas)} = 0,0550000$, que permite considerar os coeficientes como significantes se $|\tilde{b}_j| \geq 0,191203419$. Considerando isso, é possível concluir que coeficientes \tilde{b}_1 e \tilde{b}_4 são significantes e todos os outros são insignificantes. Entretanto, \tilde{b}_5 está próximo da fronteira de significância, que permite para perdas do sistema construir:

$$y_{(perdas)} = 34,100000 - 0,325000 \tilde{x}_1 + 0,600000 \tilde{x}_4 - 0,150000 \tilde{x}_5. \quad (2.20)$$

2.5.2.2. Estimação da adequação do modelo

Após desconsiderados os fatores insignificantes, é possível utilizar o critério de Fischer para estimar a adequação do modelo (2.19) e (2.20) construídos. Desta forma, com base em (2.19) e os sinais da *Tabela 2.1*, \hat{y}_n de (2.16), poderá ser calculado da seguinte maneira:

$$\hat{y}_1 = 0,985788 + 0,006688(-1) + 0,004338(-1) + 0,004338(-1) - 0,001263(1) + 0,004188(1) = 0,973349.$$

Os sinais utilizados são relativos a linha 1 da *Tabela 2.1*.

Os resultados dos cálculos dos valores \hat{y}_n , $n=1,\dots,8$ para tensão são apresentados na *Tabela 2.5*. Então, com base em (2.16), levando em consideração $N-d = 8-6 = 2$, podemos obter $D(y)_{ad(964)} = 0,00001351$ e, de tal forma de acordo com (2.15), $F=1,2079973$.

Tabela 2.5 - Resultados dos cálculos de \hat{y}_n para tensão.

Barra	\hat{y}_1	\hat{y}_2	\hat{y}_3	\hat{y}_4	\hat{y}_5	\hat{y}_6	\hat{y}_7	\hat{y}_8
964	0,973349	0,986726	0,976175	0,989551	0,976175	0,989551	0,990702	1,004078

Para nosso caso, $f_{ad} = N - d = 2$ e $f_{rep} = d - 1 = 5$. De acordo com isso, de [72], é possível encontrar para $q = 0,05, F_{cr} = 19,30$. Ao mesmo tempo, com base em (2.15), temos $F = 1,2079973 < 19,30$. De tal forma, o modelo (2.19) é adequado.

Os resultados dos cálculos dos valores \hat{y}_n , $n=1,\dots,8$ para perdas do sistema são apresentados na *Tabela 2.6*. Então, com base em (2.16), levando em consideração $N-d = 8-4 = 4$, podemos obter $D(y)_{ad(perdas)} = 0,0237500$ e, de tal forma de acordo com (2.15), $F=0,431818182$.

Tabela 2.6 - Resultados dos cálculos de \hat{y}_n para perdas.

Barra	\hat{y}_1	\hat{y}_2	\hat{y}_3	\hat{y}_4	\hat{y}_5	\hat{y}_6	\hat{y}_7	\hat{y}_8
perdas	34,875	33,025	35,175	33,325	33,975	34,525	33,675	34,225

Para nosso caso, $f_{ad} = N - d = 4$ e $f_{rep} = d - 1 = 3$. De acordo com isso, de [72], é possível encontrar para $q = 0,05, F_{cr} = 9,12$. Com base em (2.15), temos $F = 0,431818182 < 9,12$. De tal forma, o modelo (2.20) é adequado.

Levando em consideração que no modelo (2.19) temos para tensão: $\tilde{x}_1 = \frac{x_1 - 0,98000}{0,02450}$,

$$\tilde{x}_2 = \frac{x_2 - 0,98100}{0,02453}, \tilde{x}_3 = \frac{x_3 - 0,97940}{0,02449}, \tilde{x}_4 = \frac{x_4 - 1,13000}{0,01695} \text{ e } \tilde{x}_5 = \frac{x_5 - 0,97000}{0,01455},$$

temos finalmente a equação de regressão linear (não normalizada) para tensão que representa o modelo:

$$y_{t(964)} = 0,147121 + 0,272959 x_1 + 0,176860 x_2 + 0,177149 x_3 - 0,074484 x_4 + 287801 x_5. \quad (2.21)$$

Analogamente no modelo (2.20), para perdas, podemos obter:

$$y_{(perdas)} = 18,766666 - 13,265306 x_1 + 35,398230 x_4 - 10,309278 x_5. \quad (2.22)$$

De tal forma, dos modelos (2.21) e (2.22) temos os coeficientes de sensibilidade para tensão e perdas do sistema, respectivamente, os quais são apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Coeficientes de sensibilidade de tensão ($[S_{ij}^V]$) e perdas ($[S_j^L]$).

Barra (964)	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
tensão	0,147121	0,272959	0,176860	0,177149	-0,074484	0,287801	0
perdas	18,766666	-13,265306	0	0	35,398230	-10,309278	0

Os coeficientes de sensibilidade da Tabela 2.7 serão utilizados para a construção das variáveis lingüísticas: *eficiência de controle* e *incremento de perdas*. Eles também servirão de base para a construção da variável lingüística *margem adequada*.

2.6. Fuzzyficação

Fuzzyficação, bem definida em [27], como sendo um mapeamento do domínio de números crisp (em geral discretos) para o domínio fuzzy. Fuzzyficação também representa que há atribuição de valores fuzzy, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada. A fuzzyficação é uma espécie de pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, reduzindo grandemente o número de valores a serem processados. A seguir serão mostradas as formas analítica e gráfica das principais funções de pertinência utilizadas neste trabalho:

a) Função trapezoidal definida como:

$$\text{Trapezoidal } (x,a,b,c,d) \rightarrow \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a \leq x \leq b, \\ 1 & \text{se } b \leq x \leq c, \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c \leq x \leq d, \\ 0 & \text{se } x \geq d. \end{cases}$$

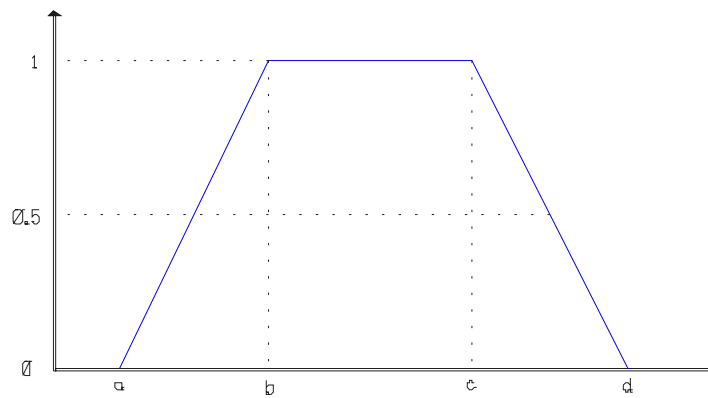


Figura 2.3 – Função de pertinência trapezoidal.

b) Função triangular definida como:

$$\text{Triangular}(x, a, b, c) \rightarrow \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a \leq x \leq b, \\ 1 & \text{se } x = b, \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b \leq x \leq c, \\ 0 & \text{se } x \geq c. \end{cases}$$

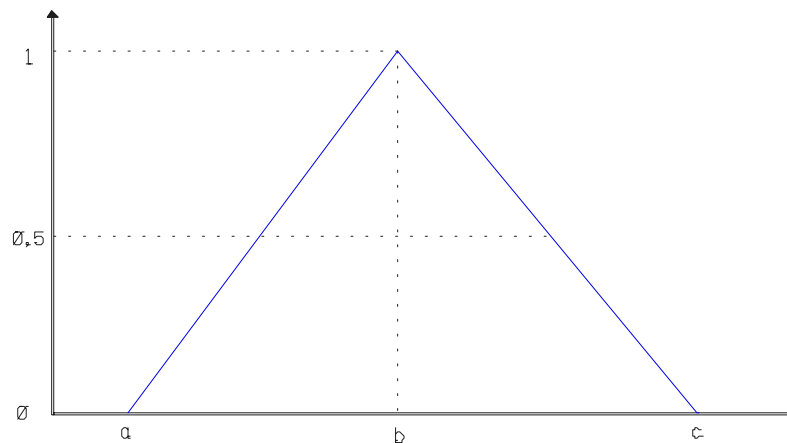


Figura 2.4 – Função de pertinência triangular.

c) Função Gaussiana definida como:

$$\text{Gaussiana}(x, c, \varphi) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\varphi} \right)^2}$$

Onde:

c é o centro do conjunto (cluster),

φ é a largura do conjunto.

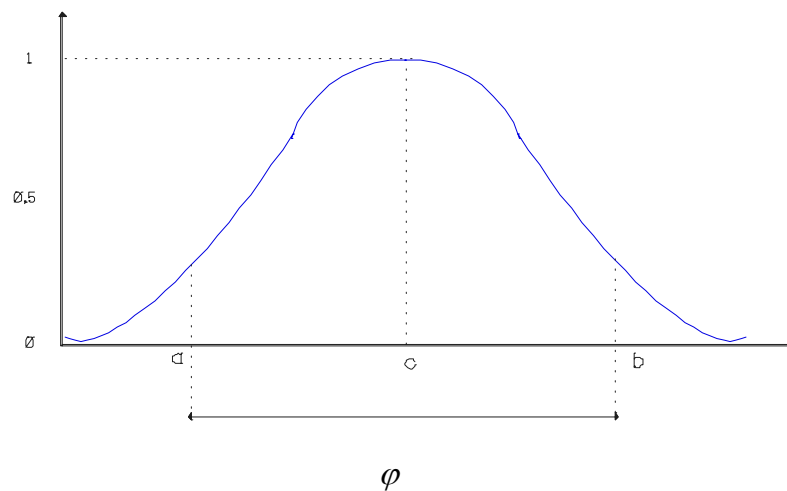


Figura 2.5 – Função de pertinência gaussiana.

d) Função sigmoidal definida como:

$$\text{Sigmoial}(x, a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}, \quad a \text{ ajusta a inclinação em } x = c.$$

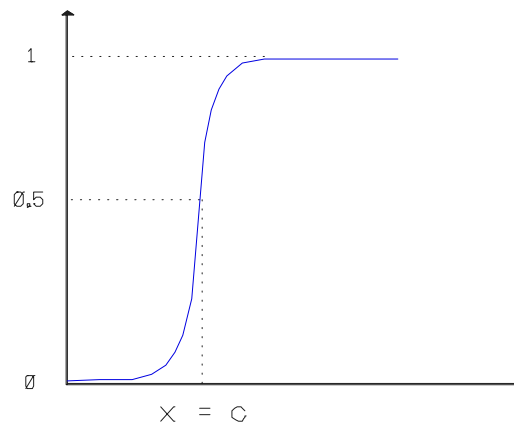


Figura 2.6 – Função de pertinência sigmoidal.

2.7. Valores fuzzy das variáveis lingüísticas

Para a análise comparativa dos procedimentos de lógica fuzzy, poderão ser feitas as seguintes variações de valores fuzzy:

a) Para regras do tipo I

Será utilizado o mesmo número de valores fuzzy para as duas variáveis de entrada (*eficiência de controle e margem adequada*).

- 3 valores fuzzy (P – Pequeno, M – Médio e G – Grande);
- 5 valores fuzzy (P – Pequeno, ME – Menor que Médio M – Médio, MA – Maior que Médio e G – Grande);
- 7 valores fuzzy (MP – Muito Pequeno, P – Pequeno, ME – Menor que Médio, M – Médio, MA – Maior que Médio, G – Grande e MG – Muito Grande);
- 9 valores fuzzy (EP – Extremamente Pequeno, MP – Muito Pequeno, P – Pequeno, ME – Menor que Médio, M – Médio, MA – Maior que Médio, G – Grande, MG – Muito Grande e EG – Extremamente Grande).

b) Para regras do tipo II

Será utilizado o mesmo número de valores fuzzy para as tres variáveis de entrada (*eficiência de controle, margem adequada e incremento de perdas*).

- 3 valores fuzzy (GN – Grande Negativo, Z – Zero e GP – Grande Positivo) para variável de entrada *incremento de perdas* e 3 valores fuzzy (P – Pequeno, M – Médio e G – Grande), para as variáveis de entrada *eficiência de controle e margem adequada*;
- 5 valores fuzzy (GN – Grande Negativo, MN – Médio Negativo, Z – Zero, MP – Médio Positivo e GP – Grande Positivo), para variável de entrada

incremento de perdas e 5 valores fuzzy (P – Pequeno, ME – menor que Médio M – Médio, MA – Maior que Médio e G – Grande), para as variáveis de entrada *eficiência de controle* e *margem adequada*;

- 7 valores fuzzy (EN – Extremo Negativo, GN – Grande Negativo, MN – Médio Negativo, Z – Zero, MP – Médio Positivo e GP – Grande Positivo, EP – Extremo Positivo), para variável de entrada *incremento de perdas* e 7 valores fuzzy (MP – Muito Pequeno, P – Pequeno, ME – Menor que Médio, M – Médio, MA – Maior que Médio, G – Grande e MG – Muito Grande), para as variáveis de entrada *eficiência de controle* e *margem adequada*.
- 9 valores fuzzy (EN – Extremo Negativo, GN – Grande Negativo, ME – Menor que médio Negativo, MN – Médio Negativo, Z – Zero, MP – Médio Positivo e GP – Grande Positivo, MA – Maior que médio positivo, EP – Extremo Positivo), para variável de entrada *incremento de perdas* e 9 valores fuzzy (EP – Extremamente Pequeno, MP – Muito Pequeno, P – Pequeno, ME – Menor que Médio, M – Médio, MA – Maior que Médio, G – Grande, MG – Muito Grande e EG – Extremamente Grande), para as variáveis de entrada *eficiência de controle* e *margem adequada*.

Embora se tenha a intenção de realizar experimentos com todos estes valores fuzzy para as regras do tipo I e do tipo II, é importante avaliar as dificuldades para elaboração de todos os requisitos necessários para efetiva realização dos mesmos, como por exemplo: a elaboração de número elevado de regras manualmente.

2.7.1. Variáveis lingüísticas de entrada

a) variável lingüística "*eficiência de controle*":

A variável lingüística *eficiência de controle* está associada com correspondentes coeficientes de sensibilidade da tensão S_{ij}^V . Por exemplo, as faixas dos valores fuzzy dessa variável lingüística (para 5 valores fuzzy) são mostrados na *Tabela 2.8*:

Tabela 2.8 – Faixas dos valores fuzzy para a variável lingüística *eficiência de controle*.

Faixa dos valores fuzzy	Valores fuzzy da variável lingüística
0,00 – 0,30	P
0,10 – 0,50	ME
0,30 – 0,70	M
0,50 – 0,90	MA
0,70 – 1,00	G

Os valores de coeficientes de sensibilidade da tensão calculados para o estudo de caso da região Metropolitana de Belo Horizonte para a barra controlada $i = 964$ e sua adequação ao intervalo de 0 a 1, são mostrados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Adequação dos coeficientes de sensibilidade para a barra controlada $i = 964$, ao intervalo [0 1].

Dispositivos J	$ S_{ij}^V $	Adequação dos valores dos Coeficientes de Sensibilidade de tensão para o intervalo de [0 1]
x_1	0,272959	0,948429
x_2	0,176860	0,614522
x_3	0,177149	0,615526
x_4	0,074484	0,258804
x_5	0,287801	1,000000

A Tabela 2.10 inclui níveis da pertinência dos valores de entrada da variável lingüística *eficiência de controle*, baseados na função de pertinência trapezoidal para a faixa dos valores fuzzy inicial e final, e triangular para faixas intermediárias de acordo com a Figura 2.7.

Tabela 2.10 – Resultado do cálculo das pertinências para *eficiência de controle* (função trapezoidal e triangular).

Dispositivos J	coeficientes de sensibilidade “normalizados”	$\mu([S_{ij}^V])$	Valor fuzzy
x_1	0,948429	1,000000	G
x_2	0,614522	0,427390	M
		0,572610	MA
x_3	0,615526	0,422370	M
		0,577630	MA
x_4	0,258804	0,205980	P
		0,794020	ME
x_5	1,000000	1,000000	G

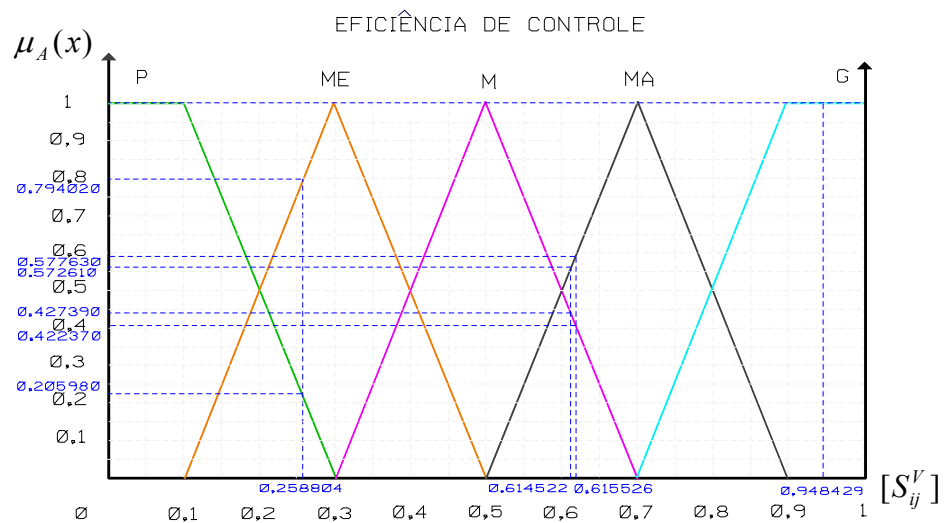


Figura 2.7 – Funções de pertinência dos valores fuzzy para a variável linguística *eficiência de controle*.

b) variável linguística "margem adequada":

A variável *margem adequada* reflete o nível de adequação de margem da variável de controle j para variação na sua saída, de maneira a resolver a violação de limites na barra controlada.

Os valores do intervalo de base para a variável linguística *margem adequada* podem ser definidos [11] com base nas seguintes considerações. Utilizando-se $|S_{ij}^V|$, é possível avaliar o grau necessário

$$d_j = \frac{|\Delta_i^V|}{|S_{ij}^V|}, \quad (2.23)$$

de utilização do correspondente dispositivo de regulação ou compensação j para eliminar a violação (Δ_i^V) da restrição no nível de tensão da barra i . O grau d_j serve como intervalo de base da variável *margem adequada*. Usando o valor d_j , é possível avaliar o nível de margem do dispositivo j na seguinte maneira:

$$m_j = \frac{u_j}{d_j}. \quad (2.24)$$

Em (2.24), u_j é o grau de utilização da capacidade disponível do dispositivo definido por (2.1) ou por (2.2).

Em particular, de acordo com (2.23) para barra $i = 964$ com $\Delta_i^V = 0,0291$, temos $d_1 = \frac{|0,0291|}{|0,272959|} = 0,10661$. Da mesma maneira foram obtidos $d_2 = 0,16454$, $d_3 = 0,16427$, $d_4 = 0,39069$ e $d_5 = 0,10111$. Esses valores permitem obter de acordo com (2.24) $m_1 = \frac{0,0700}{0,10661} = 0,65660$ e, da mesma forma, $m_2 = 0,41935$, $m_3 = 0,42978$, $m_4 = 0,47352$ e $m_5 = 1,78024$. A Tabela 2.11 contempla os dados das variáveis de controle para outras as barras.

Tabela 2.11 – Dados das variáveis de controle (níveis existentes e limites permissíveis dos dispositivos j) em relação a barra $i = 964$.

Barra	Fatores	x_j^e	\underline{x}_j	\bar{x}_j	u_j	d_j	m_j
1513	x_1 [p.u.]	0,98000	0,95000	1,05000	0,0700	0,10661	0,65660
1500	x_2 [p.u.]	0,98100	0,95000	1,05000	0,0690	0,16454	0,41935
355	x_3 [p.u.]	0,97940	0,95000	1,05000	0,0706	0,16427	0,42978
4027	x_4 [Tap]	1,13000	0,94500	1,15500	0,1850	0,39069	0,47352
314	x_5 [Tap]	0,97000	0,95200	1,15000	0,1800	0,10111	1,78024
376	x_6 [Tap]	1,02000	0,94700	1,15800	0,1380	1,01766	0,13561

Os resultados dos cálculos das pertinências dos valores da variável lingüística *margem adequada* (m_j), baseados na função de pertinência trapezoidal para os valores iniciais e finais e triangular para os valores intermediários são apresentados na Tabela 2.12 e refletidos pelas Figura 2.8-2.12.

Tabela 2.12 – Resultado do cálculo das pertinências de *margem adequada* (função trapezoidal e triangular).

Dispositivos j	Valores de m_j “normalizados”	$\mu(m_j)$	Valor fuzzy
x_1	0,368827	0,344135	M
		0,655865	ME
x_2	0,235558	0,322210	P
		0,677790	ME
x_3	0,241417	0,292915	P
		0,707085	ME
x_4	0,265987	0,170065	P
		0,829935	ME
x_5	1,000000	1,000000	G

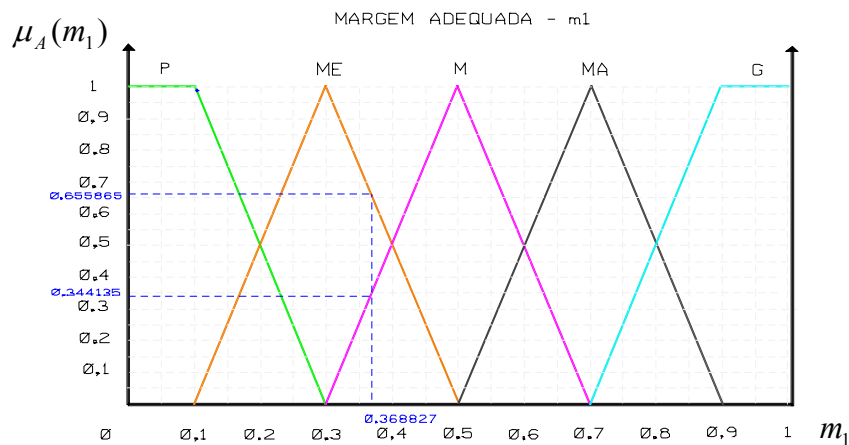


Figura 2.8 – Funções de pertinência dos valores fuzzy para variável linguística *margem adequada* (dispositivo x_1).

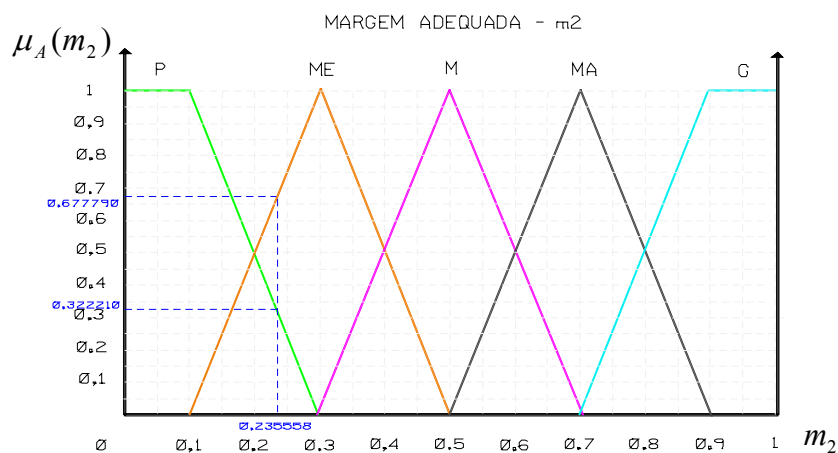


Figura 2.9 Funções de pertinência dos valores fuzzy para variável linguística *margem adequada* (dispositivo x_2).

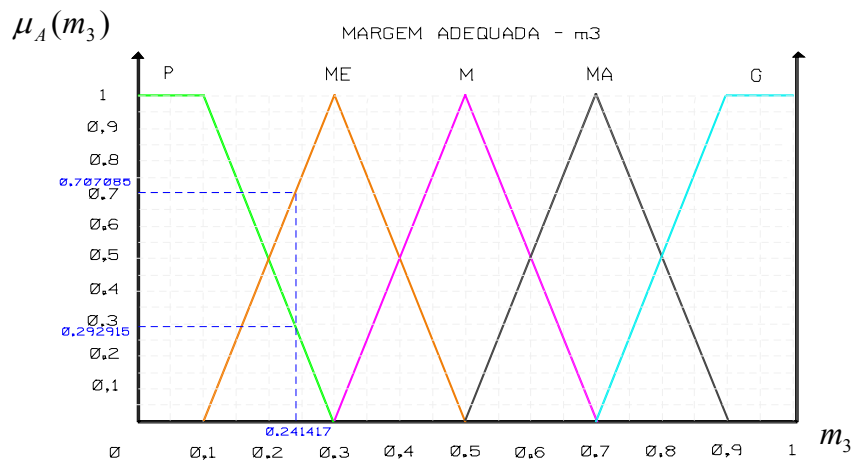


Figura 2.10 – Funções de pertinência dos valores fuzzy para variável linguística *margem adequada* (dispositivo x_3)

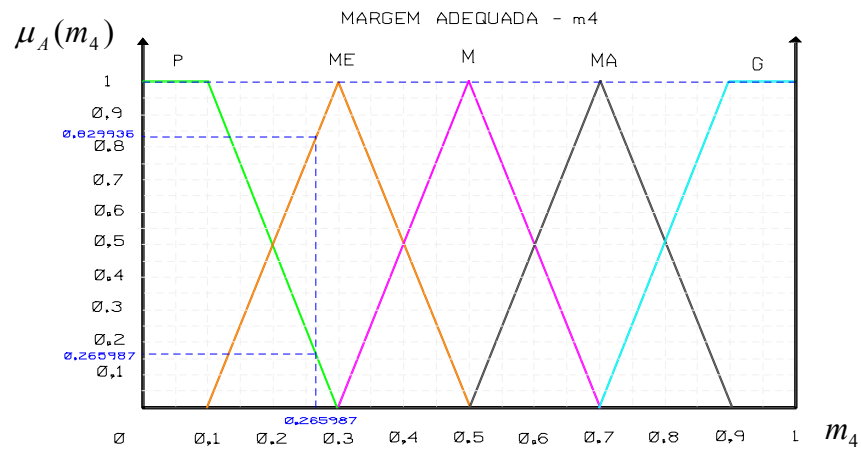


Figura 2.11 – Funções de pertinência dos valores fuzzy para variável linguística *margem adequada* (dispositivo x_4).

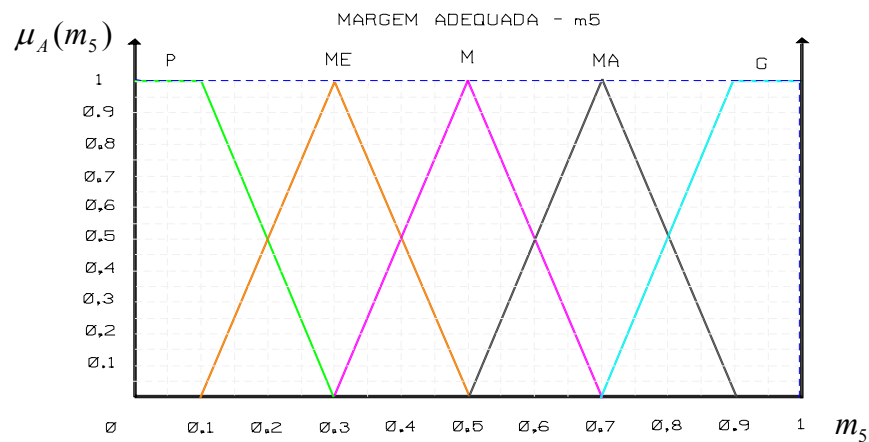


Figura 2.12 – Funções de pertinência dos valores fuzzy para variável linguística *margem adequada* (dispositivo x_5).

c) variável lingüística "*incremento de perdas*":

A variável lingüística *incremento de perdas* corresponde aos incrementos das perdas do sistema gerados pelas ações de controle. Essa variável pode ser refletida por três, cinco ou mais valores fuzzy. Na qualidade desses valores podemos considerar, por exemplo, para cinco valores fuzzy os seguintes: Grande Negativo - GN, Médio Negativo – MN, Zero – Z, Médio Positivo – MP e Grande Positivo – GP. Ou para três valores fuzzy: Grande Negativo - GN, Zero – Z e Grande Positivo – GP, etc.

Tabela 2.13 - Faixas para 3 valores fuzzy para a variável lingüística incremento de perdas.

Faixa dos valores fuzzy	Valores fuzzy
-1,0 – 0,0	Grande Negativo (GN)
-0,6 – 0,6	Zero(Z)
0,0 – 1,0	Grande Positivo (GP)

Valores de entrada da variável lingüística *incremento de perdas*, calculados para o estudo de caso da região Metropolitana de Belo Horizonte da CEMIG e sua adequação ao intervalo de -1 a +1, são mostrados na *Tabela 2.14*.

Tabela 2.14 – Adequação dos resultados do cálculo do incremento de perdas ao intervalo de [-1 + 1].

Dispositivo J	S_j^L	Adequação dos valores de incremento de perdas para o intervalo de [-1 +1]
x_1	-13,265306	- 0,374745
x_2	0	0
x_3	0	0
x_4	35,398230	1,000000
x_5	-10,309278	- 0,291237

Os resultados dos cálculos das pertinências dos valores fuzzy da variável lingüística *incremento de perdas*, baseados na função de pertinência trapezoidal e triangular são refletidos na *Tabela 2.15*, e seu gráfico é mostrado na *Figura 2.13*.

Tabela 2.15 – Resultado do cálculo das pertinências (função trapezoidal).

Dispositivos j	Incremento de perdas “normalizados”	$\mu(S_j^L)$	Valor fuzzy
x_1	-0,374745	0,468431	GN
		0,563138	Z
x_2	0	1,000000	Z
x_3	0	1,000000	Z
x_4	1,000000	1,000000	GP
x_5	-0,291237	0,364046	GN
		0,771908	Z

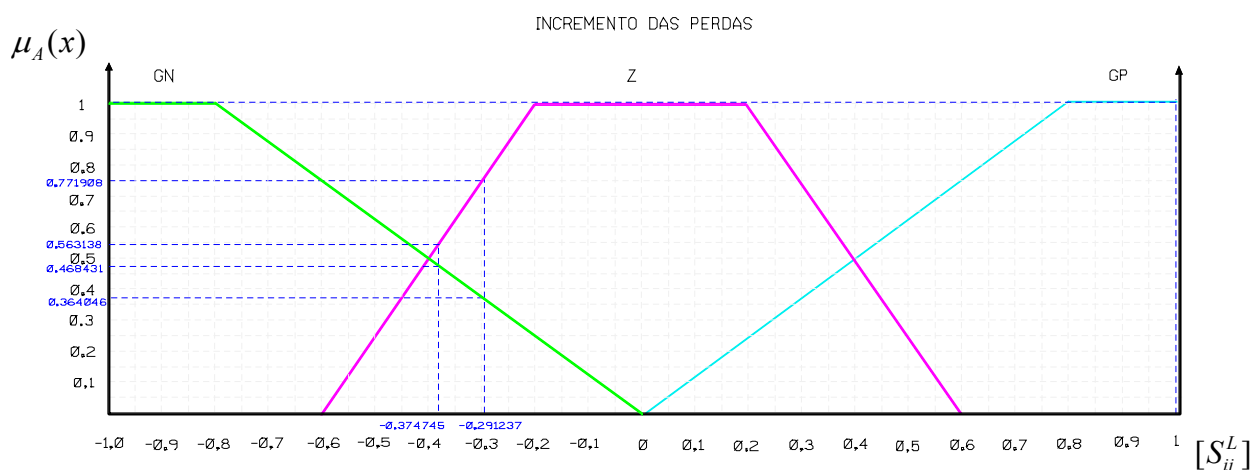


Figura 2.13 – Funções de pertinência dos valores fuzzy para variável linguística *incremento de perdas* (3 valores fuzzy).

A Tabela 2.16 apresenta todos os valores calculados para todas as variáveis de entrada (*eficiência de controle, margem adequada e incremento de perdas*).

Tabela 2.16 – Valores das variáveis linguísticas de entrada (*eficiência de controle, margem adequada e incremento de perdas*).

Dispositivos (j)	<i>eficiência de controle</i>	<i>margem adequada</i>	<i>incremento de perdas</i>
1	0,948429	0,368827	-0,374745
2	0,614522	0,235558	0,000000
3	0,615526	0,241417	0,000000
4	0,258804	0,265987	1,000000
5	1,000000	1,000000	-0,291237

Os valores apresentados na tabela anterior, serão utilizados em todo o trabalho como os valores de entrada para o controlador fuzzy.

2.7.2. Variável lingüística de saída

a) variável lingüística "intensidade de utilização":

A variável *intensidade de utilização* reflete o grau de utilização da capacidade disponível dos dispositivos para eliminar a violação existente refletindo em ação de aumentar (diminuir) a saída do dispositivo. O gráfico dos valores fuzzy desta variável é mostrado na *Figura 2.14*.

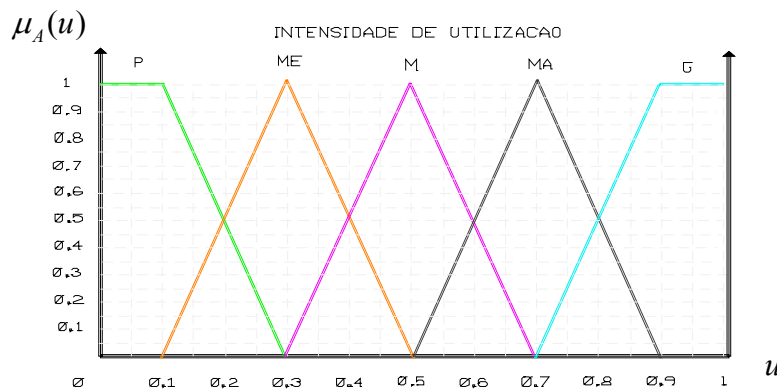


Figura 2.14 – Funções de pertinência dos valores fuzzy para a variável lingüística *intensidade de utilização*.

Como pode ser observado nas *Figuras de (2.7 a 2.14)* a sobreposição dos valores fuzzy inicialmente utilizados foi de 50%, levando em conta as considerações de [27], que indica que, sobreposições de 25% a 75% oferecem resultados eficientes.

2.8. Apresentação das regras da base de conhecimento

As regras do tipo I e do tipo II apresentadas anteriormente refletem estratégias gerais de controle. Cada uma dessas regras deve ser apresentada por um conjunto de regras concretas definidas por valores fuzzy das correspondentes variáveis lingüísticas. Levando isso em conta, a seguir são considerados conjuntos das regras concretas associadas com regras gerais do tipo I e do tipo II com utilização de diferentes números dos valores fuzzy para variáveis lingüísticas.

2.8.1. Regras do tipo I

Para três valores fuzzy (P, M e G) o conjunto das regras concretas pode ser refletido pela *Tabela 2.17*.

Tabela 2.17 – Matriz de regras para duas variáveis de entrada e três valores fuzzy.

Ef.C. M.ad.	P	M	G
P	P	P	P
M	P	M	M
G	P	M	G

Para cinco valores fuzzy (P, ME, M, MA e G) o conjunto das regras concretas é mostrado na *Tabela 2.18*.

Tabela 2.18 – Matriz de regras para duas variáveis de entradas e cinco valores fuzzy.

Ef.C. M.ad.	P	ME	M	MA	G
P	P	P	P	P	P
ME	P	ME	ME	ME	ME
M	P	ME	M	M	M
MA	P	ME	M	MA	MA
G	P	ME	M	MA	G

Para sete valores fuzzy (MP, P, ME, M, MA, G e MG) o conjunto das regras concretas é refletido pela *Tabela 2.19*.

Tabela 2.19 – Matriz de regras para duas variáveis de entrada e sete valores fuzzy.

Ef.C. M.ad.	MP	P	ME	M	MA	G	MG
MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP
P	MP	P	P	P	P	P	P
ME	MP	P	ME	ME	ME	ME	ME
M	MP	P	ME	M	M	M	M
MA	MP	P	ME	M	MA	MA	MA
G	MP	P	ME	M	MA	G	G
MG	MP	P	ME	M	MA	G	MG

Finalmente, para nove valores fuzzy (EP, MP, P, ME, M, MA, G, MG e EG) o conjunto das regras concretas é refletido pela *Tabela 2.20*.

Tabela 2.20 – Matriz de regras para duas variáveis de entrada e nove valores fuzzy.

Ef.C. M.Ad.	EP	MP	P	ME	M	MA	G	MG	EG
EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP	EP
MP	EP	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP
P	EP	MP	P	P	P	P	P	P	P
ME	EP	MP	P	ME	ME	ME	ME	ME	ME
M	EP	MP	P	ME	M	M	M	M	M
MA	EP	MP	P	ME	M	MA	MA	MA	MA
G	EP	MP	P	ME	M	MA	G	G	G
MG	EP	MP	P	ME	M	MA	G	MG	MG
EG	EP	MP	P	ME	M	MA	G	MG	EG

2.8.2. Regras do tipo II

Para três valores fuzzy (P, M e G) para *eficiência de controle e margem adequada* e 3 valores fuzzy (GN, Z e GP) para *incremento de perdas*, o conjunto das regras concretas são refletidas por matriz tridimensional com 27 regras, esta matriz pode ser apresentada como a seqüência abaixo:

Obs: Devido ao alto volume de regras para 5 e 7 valores fuzzy, suas seqüências serão apresentadas no *Anexo IV*.

1	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
2	SE	<i>Eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
3	SE	<i>Eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
4	SE	<i>Eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
5	SE	<i>Eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
6	SE	<i>Eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
7	SE	<i>Eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
8	SE	<i>Eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
9	SE	<i>Eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
10	SE	<i>Eficiência de controle</i>	é	M	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
11	SE	<i>Eficiência de controle</i>	é	M	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
12	SE	<i>Eficiência de controle</i>	é	M	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
13	SE	<i>Eficiência de controle</i>	é	M	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	M	SENÃO
14	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	M	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	M	SENÃO
15	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	M	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
16	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	M	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	M	SENÃO
17	3SE	<i>eficiência de controle</i>	é	M	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	M	SENÃO
18	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	M	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
19	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
20	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
21	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
22	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	M	SENÃO
23	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	M	SENÃO
24	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
25	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	G	SENÃO
26	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	G	SENÃO
27	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	M	

CAPÍTULO 3

INFERÊNCIA FUZZY: ESQUEMAS E SEUS ESTUDOS

3.1. Considerações gerais

As etapas de tecnologia de controle fuzzy, de acordo com o sistema de controle (*Figura 1.1*), são associadas com procedimentos de fuzzyficação, inferência fuzzy e defuzzyficação. O objetivo do procedimento de inferência [27],[74],[75] é processar os dados fuzzy de entrada, juntamente com as regras, incluídas na base de conhecimento, de modo a inferir as ações de controle, aplicando um operador de implicação fuzzy.

Existem diversas esquemas de inferência fuzzy [53]. Levando isso em consideração, o presente capítulo, está associado com experimentos computacionais e sua análise, dedicados à comparação dos diferentes esquemas principais de inferência fuzzy do ponto de vista de nebulosidade dos resultados obtidos com sua base.

Os resultados dos procedimentos de lógica fuzzy considerando as etapas de fuzzyficação, inferência fuzzy e defuzzyficação poderão ser vistos no capítulo 4.

3.2. Inferência fuzzy

É possível distinguir dois problemas fundamentais [26],[52],[53] da inferência fuzzy: *generalizado modus ponens* e *generalizado modus tollens*. Esses problemas são relacionados ao raciocínio aproximado e, do ponto de vista de realização, são associados com a composição das relações fuzzy [26],[45],[53].

No caso do *generalizado modus ponens*, se a regra SE-ENTÃO e seu antecedente são aproximadamente conhecidos, a correspondente consequência pode ser inferida. Em outras palavras, o *generalizado modus ponens* pode ser apresentado da seguinte maneira:

$$\frac{\text{SE } x \text{ é } A \text{ ENTÃO } y \text{ é } B}{x \text{ é } A'}{y \text{ é } B'} \quad (3.1)$$

Nosso problema é definir B' . Do ponto de vista analítico, o *generalizado modus ponens* pode ser realizado com base na composição de A' com a relação de implicação $R(x,y)$ (regra composicional de inferência proposta pela L.A. Zadeh) [45],[53],[76].

$$B' = A' \circ R(x,y). \quad (3.2)$$

Se $A'=A$ e $B'=B$, o *generalizado modus ponens* é reduzido a conhecida tautologia *modus ponens* da lógica clássica.

No caso do *generalizado modus tollens*, se a regra SE-ENTÃO e sua consequência é aproximadamente conhecida, o correspondente antecedente pode ser inferido. Desta forma, o *generalizado modus tollens* pode ser apresentado da seguinte maneira:

$$\frac{\text{SE } x \text{ é } A \text{ ENTÃO } y \text{ é } B}{y \text{ é } B'}{x \text{ é } A'} \quad (3.3)$$

Aqui, nosso problema é definir A' , e o *generalizado modus tollens* pode ser realizado com base na composição de B' com a relação de implicação $R(x,y)$ [45],[53],[76]:

$$A' = R(x,y) \circ B'. \quad (3.4)$$

Se $A'=\text{NÃO } A$ e $B'=\text{NÃO } B$, o *generalizado modus tollens* é reduzido à conhecida tautologia *modus tollens* da lógica clássica.

Foram propostas mais que 40 diferentes formas para as relações de implicação, que são baseadas nos correspondentes operadores de implicação fuzzy [26],[48],[53]. Considerando isso, é necessário indicar, que a seleção do operador de implicação é o processo substancial, o qual está associado com considerações lógicas e intuitivas e,

também, com interpretações das conexões da lógica fuzzy (E, OU, MAIS, etc.). Ao mesmo tempo, a análise, por exemplo, de [26],[45],[53],[62],[74],[75] mostra, que operador de implicação de Mamdani possui a mais ampla aplicação prática. A utilização desse operador corresponde a regra composicional de inferência *max-min*. A realização dela é idêntica à multiplicação matricial, quando as operações de adição (+) e multiplicação (×) são substituídas pelos operadores *max* (∨) e *min* (∧), respectivamente. Um outro operador de implicação que achou aplicação ampla, é o operador de Larsen [53]. Sua utilização corresponde à regra composicional de inferência *max-produto*. Levando isso em consideração, nesse trabalho é utilizada a regra composicional de inferência *max-min*, *max-produto* e duas variações das mesmas, as quais nomeamos como *max-min-produto* e *max-produto-min*, cujos procedimentos adotados para estas variações serão descritos posteriormente. O processo de inferência será subdividido em cinco etapas e serão definidas para cada procedimento de inferência utilizado neste trabalho, onde também um exemplo para o procedimento de inferência *max-min-produto* será mostrado.

Considerando o exposto, podemos apresentar (3.2) através das funções de pertinência $\mu_{A'}(x)$, $\mu_{B'}(x)$ e $\mu(x,y)$ de estimativas fuzzy A' , B' e $R(x,y)$, respectivamente, da seguinte maneira:

$$\mu_{B'}(y) = \bigvee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu(x, y)] \quad (3.5)$$

para o caso de *max-min*,

$$\mu_{B'}(y) = \bigvee_x [\mu_{A'}(x) \cdot \mu(x, y)] \quad (3.6)$$

para o caso de *max-produto*,

$$\mu_{B'}(y) = \bigvee_x [[\mu_{A'}(x) \wedge \mu(x, y)]] \quad (3.7)$$

para o caso de *max-min-produto*,

$$\mu_{B'}(y) = \bigvee_x [\wedge [\mu_{A'}(x) \cdot \mu(x, y)]] \quad (3.8)$$

para o caso do *max-produto-min*.

Para mostrar o uso de (3.5) e (3.6) apresentamos um exemplo simples, considerado em [53]. As funções de pertinência de A e B de (3.1) são apresentadas nas *Figuras 3.1* e *3.2*, respectivamente. A função de pertinência de A' de (3.1), que é o singleton, é mostrada na *Figura 3.3*. Estas funções de pertinência são:

$$A = \sum_{i=1}^{10} \mu_A(x)/x_i = 0,50/2 + 1,00/3 + 0,50/4, \quad (3.9)$$

$$B = \sum_{i=1}^{10} \mu_B(x)/x_i = 0,33/5 + 0,67/6 + 1,00/7 + 0,67/8 + 0,33/9, \quad (3.10)$$

$$A' = \sum_{i=1}^{10} \mu_{A'}(x)/x_i = 1,00/4. \quad (3.11)$$

No exemplo, todas as variáveis têm a mesma variável de base (inteiros de 1 a 10).

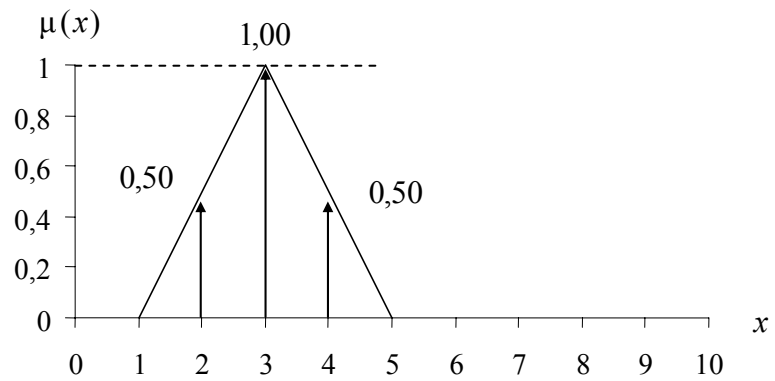


Figura 3.1 – Função de pertinência de A

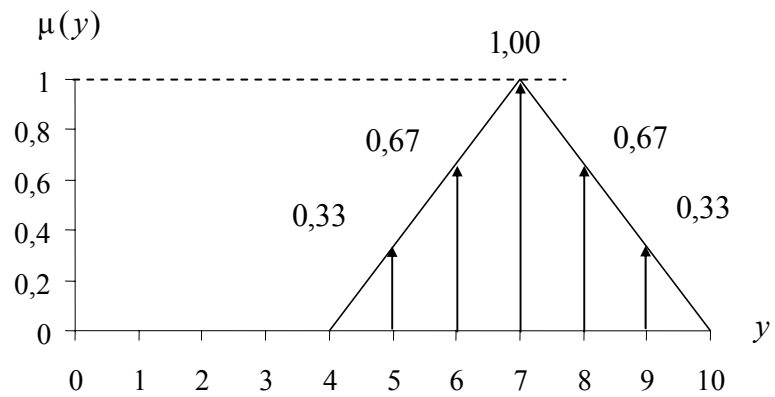


Figura 3.2. – Função de pertinência de B

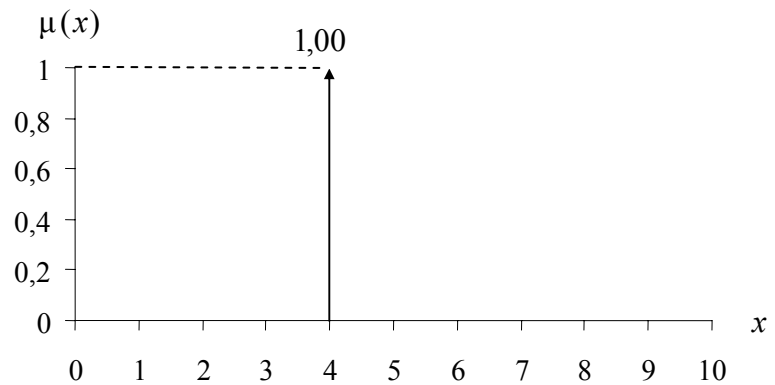


Figura 3.3. – Função de pertinência de A'

Primeiramente, construímos a função de pertinência $\mu(x_i, y_i)$ da relação de implicação $R(x_i, y_i)$, que reflete a regra com base do operador de implicação de Mamdani. Pelo fato de ter valores fuzzy discretos, utilizam também relações fuzzy discretas. A função de pertinência de relação de implicação de Mamdani é definida como

$$\mu(x_i, y_i) = \mu_A(x_i) \wedge \mu_B(y_i). \quad (3.12)$$

A construção de $R(x_i, y_i)$ é baseada no uso do produto Cartesiano:

$$R(x_i, y_i) = \sum_{(x_i, y_i)} \mu(x_i, y_i) / (x_i, y_i), \quad (3.13)$$

que permite obter a matriz de *Tabela 3.1*.

Tabela 3.1 – Matriz de relação fuzzy.

y_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_i										
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0,33	0,50	0,50	0,50	0,33	0
3	0	0	0	0	0,33	0,67	1,00	0,67	0,33	0
4	0	0	0	0	0,33	0,50	0,50	0,50	0,33	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Considerando somente $\mu(x_i, y_i) > 0$ da *Tabela 3.1*, é possível escrever

$$R(x_i, y_i) = \begin{bmatrix} 0,33 & 0,50 & 0,50 & 0,50 & 0,33 \\ 0,33 & 0,67 & 1,00 & 0,66 & 0,33 \\ 0,33 & 0,50 & 0,50 & 0,50 & 0,33 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Agora, com base em (3.2), é possível realizar a inferência fuzzy

$$B'(y_i) = A'(x_i) \circ R(x, y)$$

$$\begin{aligned}
 &= [0 \ 0 \ 1] \circ \begin{bmatrix} 0,33 & 0,50 & 0,50 & 0,50 & 0,33 \\ 0,33 & 0,67 & 1,00 & 0,66 & 0,33 \\ 0,33 & 0,50 & 0,50 & 0,50 & 0,33 \end{bmatrix} \\
 &= [\vee_x [0 \wedge 0,33; 0 \wedge 0,33; 1,00 \wedge 0,33] \ \vee_x [0 \wedge 0,50; 0 \wedge 0,67; 1,00 \wedge 0,50] \\
 &\quad \vee_x [0 \wedge 0,50; 0 \wedge 1,00; 1,00 \wedge 0,50] \ \vee_x [0 \wedge 0,50; 0 \wedge 0,67; 1,00 \wedge 0,50] \\
 &\quad \vee_x [0 \wedge 0,33; 0 \wedge 0,33; 1,00 \wedge 0,33]] \\
 &= [0,33 \ 0,50 \ 0,50 \ 0,50 \ 0,33] \\
 &= [0,33/5 \ 0,50/6 \ 0,50/7 \ 0,50/8 \ 0,33/9]. \tag{3.15}
 \end{aligned}$$

Da mesma maneira, desenvolvemos o exemplo acima com base em Larsen:

A função de pertinência de relação de implicação de Larsen é definida como

$$\mu(x_i, y_i) = \mu_A(x_i) \cdot \mu_B(y_i). \tag{3.16}$$

Tomando os valores não zero da matriz 3.1, temos:

$$\begin{aligned}
 &= [0 \ 0 \ 1] \circ \begin{bmatrix} 0,33 & 0,50 & 0,50 & 0,50 & 0,33 \\ 0,33 & 0,67 & 1,00 & 0,66 & 0,33 \\ 0,33 & 0,50 & 0,50 & 0,50 & 0,33 \end{bmatrix} \\
 &= [\vee_x [0.0,33; 0.0,33; 1,00.0,33] \ \vee_x [0.0,50; 0.0,67; 1,00.0,50] \\
 &\quad \vee_x [0.0,50; 0.1,00; 1,00.0,50] \ \vee_x [0.0,50; 0.0,67; 1,00.0,50] \\
 &\quad \vee_x [0.0,33; 0.0,33; 1,00.0,33]] \\
 &= [0,33 \ 0,50 \ 0,50 \ 0,50 \ 0,33] \\
 &= [0,33/5 \ 0,50/6 \ 0,50/7 \ 0,50/8 \ 0,33/9]. \tag{3.17}
 \end{aligned}$$

A generalização de (3.1) para um número de regras arbitrário, e um número de entradas destas regras também arbitrário, podem ser apresentada pelo seguinte algoritmo fuzzy [60],[61].

$$\begin{array}{l}
 \text{SE } x_1 = a_{11} \text{ E } \dots \text{ E } x_k = a_{1k} \text{ E } \dots \text{ E } x_m = a_{1m} \text{ ENTÃO } y = b_1 \text{ SENÃO} \\
 \dots \\
 x_1 = a_{p1} \text{ E } \dots \text{ E } x_k = a_{pk} \text{ E } \dots \text{ E } x_m = a_{pm} \text{ ENTÃO } y = b_p \text{ SENÃO} \\
 \dots \\
 \text{SE } x_1 = a_{t1} \text{ E } \dots \text{ E } x_k = a_{tk} \text{ E } \dots \text{ E } x_m = a_{tm} \text{ ENTÃO } y = b_t \\
 x_1 = a'_1 \text{ E } \dots \text{ E } x_k = a'_k \text{ E } \dots \text{ E } x_m = a'_m \\
 \hline
 y = b' \quad (3.18)
 \end{array}$$

onde a_{pk} , $p=1,\dots,t$, $k=1,\dots,m$ e b_p , $p=1,\dots,t$ são estimativas lingüísticas A_{pk} e B_p com as funções de pertinência $\mu_{A_{pk}}(x_k)$ e $\mu_{B_p}(y)$, respectivamente; b' deve ser inferido para arbitrários $x_1 = a'_1, \dots, x_k = a'_k, \dots, x_m = a'_m$; a conexão SENÃO pode ser interpretada na qualidade de operador de implicação OU (\wedge) [26],[45],[48],[51-53].

A expressão (3.2) é possível generalizar da seguinte maneira:

$$\mu_{B'}(y) = \mu_{A'_1}(x_1) \circ \dots \circ \mu_{A'_k}(x_k) \circ \dots \circ \mu_{A'_m}(x_m) \circ R \quad (3.19)$$

onde:

R é a matriz de dimensão $(m+1)$ de relações de implicação, que é equivalente as regras de (3.18).

Se \circ é o operador de implicação de Mamdani, então a correlação (3.19) pode ser apresentada da seguinte maneira:

$$\mu_{B'}(y) = \mu_{A'_1}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{A'_k}(x_k) \wedge \dots \wedge \mu_{A'_m}(x_m) \circ R. \quad (3.20)$$

De tal forma, a realização da inferência fuzzy com base de (3.19) ou (3.20) está associada com manipulações de matrizes multidimensionais (matrizes de dimensão $(m+1)$). Estas

manipulações podem encontrar dificuldades de caráter computacional [52]. Ao mesmo tempo, é possível evitar as dificuldades [47],[60-62] com base no chamado algoritmo multidimensional de inferência fuzzy, introduzindo o conceito [52],[77] da medida da possibilidade “ a_{pk} é a'_k ”:

$$\text{Poss}(a_{pk} | a'_k) = \bigvee_{x_k} \mu_{A_{pk}}(x_k) \wedge \mu_{A'_k}(x_k). \quad (3.21)$$

Utilizando a definição (3.21), é possível construir

$$\text{Poss}(a_{p1}, \dots, a_{pk}, \dots, a_{pm} | a'_1, \dots, a'_k, \dots, a'_m) = \bigwedge_k \text{Poss}(a_{pk} | a'_k), \quad (3.22)$$

a qual reflete a medida da possibilidade que o conceito composto, descrito pelos valores $a_{p1}, \dots, a_{pk}, \dots, a_{pm}$, é o conceito composto caracterizado por $a'_1, \dots, a'_k, \dots, a'_m$. Com base de (3.21) e (3.22) é possível construir

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \bigvee_p [\mu_{B_p}(y_p) \wedge \text{Poss}(a_{p1}, \dots, a_{pk}, \dots, a_{pm} | a'_1, \dots, a'_k, \dots, a'_m)] \\ &= \bigvee_p [\mu_{B_p}(y_p) \wedge \bigwedge_k \text{Poss}(a_{pk} | a'_k)]. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Resolvemos o exemplo, considerado acima, com base no algoritmo multidimensional de inferência fuzzy (3.21) - (3.23). Em particular, utilizando (3.21), é possível obter

$$\text{Poss}(a | a') = [(0,50 \wedge 0) \vee (1,00 \wedge 0) \vee (0,50 \wedge 1,00)] = 0,50 \quad (3.24)$$

que oferece, com base em (3.23), a solução

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= [0,33 \ 0,67 \ 1,00 \ 0,67 \ 0,33] \wedge 0,50 \\ &= [0,33 \ 0,50 \ 0,50 \ 0,50 \ 0,33] \end{aligned} \quad (3.25)$$

coincidindo com a solução (3.17).

As estimativas de complexidade computacional de realização da inferência fuzzy com base nas manipulações com as matrizes multidimensionais de relações de implicação e o algoritmo multidimensional, que foram construídas em [43],[47], mostram a eficiência da utilização do último. Esta circunstância e também a comodidade de implementação do algoritmo multidimensional justificam a aplicação do mesmo. Da mesma maneira é

possível construir o algoritmo multidimensional para o operador de implicação *max-produto* e suas variações.

Para mostrar os procedimentos de inferência fuzzy *max-min-produto* e *max-produto-min* que foram considerados como variações dos procedimentos de inferência fuzzy *max-min* e *max-produto*, será mostrado que o processo de inferência fuzzy, baseado na teoria das possibilidades, pode ser subdividido em cinco etapas a saber.

Para mostrar o processo, suponhamos o caso em que temos duas variáveis lingüísticas de entrada e uma variável lingüística de saída, assim teremos regras com dois antecedentes e um conseqüente (regras do tipo I e cinco valores fuzzy para todas as variáveis lingüísticas envolvidas), porém é importante ressaltar que as etapas descritas abaixo são significativas para números arbitrários de regras e números arbitrários de variáveis de entradas.

Da 1ª a 3ª etapa é considerada a fase de implicação que trata dos antecedentes da regra, na 4ª etapa é considerado a fase de implicação que trata do conseqüente da regra e finalmente na 5ª etapa é considerado a fase de agregação de todas as regras envolvidas na inferência fuzzy.

1ª etapa:

O valor de entrada da primeira variável lingüística da regra, depois de fuzzyficado, cada valor fuzzy proveniente da fuzzyficação, é comparado (*Poss*) com o vetor de possibilidades correspondente ao valor fuzzy do primeiro antecedente da regra em análise. Se o método utilizado for o *max-min* de Mamdani, na comparação escolhe-se o *mínimo* para cada par comparado, se o método utilizado for o *max-produto* de Larsen, na comparação faz-se o *produto* entre cada par comparado, se o método utilizado for *max-min-produto*, na comparação escolhe-se o *mínimo* para cada par comparado e se for o método *max-produto-min*, na comparação faz-se o *produto* entre cada par comparado. Fazemos o mesmo para o segundo valor de entrada fuzzy. Nesta fase obtemos um vetor do tamanho do vetor de possibilidades para cada valor fuzzy de cada entrada.

2ª etapa:

De posse dos vetores obtidos na 1ª etapa para cada valor fuzzy de cada entrada, escolhemos um único valor para cada vetor, nesta etapa escolhemos o maior valor (*máximo*) para cada vetor para qualquer um dos quatro procedimentos de inferência fuzzy adotado.

3ª etapa:

Nesta etapa temos um valor para cada função *Poss* calculada de acordo com cada regra, e dentre estes valores, escolhemos um único valor para cada conjunto de valores de cada regra considerando os antecedentes das regras. Estes cálculos serão efetuados de acordo com o procedimento de inferência fuzzy adotado (o *mínimo* para *max-min*, *max-min-produto* e o *produto* para *max-produto*, *max-produto-min*).

4ª etapa:

Uma vez de posse de um único valor resultante para os antecedentes de cada regra, fazemos a comparação entre o resultado para os antecedentes de cada regra e o vetor de possibilidades do conseqüente da regra correspondente obedecendo à mesma seqüência de acordo com cada método (*mínimo* para *max-min*, *max-produto-min* e *produto* para *max-produto*, *max-min-produto*), nesta etapa obtemos um vetor para cada regra como resultado e estes vetores podem ser considerados como sendo o vetor que representa a contribuição de cada regra.

5ª etapa:

De posse dos vetores resultantes da fase de implicação para cada regra, os colocamos dispostos em forma de matriz, então é efetuado o processo chamado de agregação, ou seja, é escolhido o valor *máximo* na vertical, considerando para tal a coluna da matriz. Nesta etapa obtém-se um vetor único ($\mu_B(u)$) que será a saída da inferência e que representa o resultado final da inferência considerando todas as regras envolvidas no processo.

O exemplo elaborado a seguir mostra as cinco etapas de cálculo para o procedimento de inferência fuzzy *max-min-produto* e de maneira análoga poderá ser pensado para *max-produto-min*.

a) Variáveis de entrada:

Eficiência de Controle = Entrada 1 (E1) = 0,61,

Margem Adequada = Entrada 2 (E2) = 0,23.

b) Fuzzyficação das variáveis de entrada:

E1 = 0,61 \longrightarrow 0,42 (M) e 0,57 (MA),

E2 = 0,23 \longrightarrow 0,32 (P) e 0,67 (ME).

c) Regras da base de conhecimento ativadas:

R11: M e P \rightarrow P,

R12: M e ME \rightarrow ME,

R16: MA e P \rightarrow P,

R17: MA e ME \rightarrow ME.

d) Cálculo do *Poss*

1ª e 2ª etapas para R11:

R11: E1

Poss (M/E1)

$$Poss (M/M) = Poss (M/0,42) = \max\{0,25; 0,42; 0,42; 0,42; 0,42; 0,42; 0,25\} = 0,42,$$

$$Poss (M/MA) = Poss (M/0,57) = \max\{0,25; 0,50; 0,57; 0,57; 0,57; 0,50; 0,25\} = 0,57.$$

R11: E2

Poss ((P/E2)

$$Poss (P/P) = Poss (P/0,32) = \max\{0,32; 0,32; 0,32; 0,32; 0,32; 0,25\} = 0,32,$$

$$Poss (P/ME) = Poss (P/0,67) = \max\{0,67; 0,67; 0,67; 0,67; 0,50; 0,25\} = 0,67.$$

3ª etapa para R11:

Resultado de R11: min entre todos os resultados de cada $Poss = 0,32$,

Analogamente é efetuado o cálculo para as regras R12, R16 e R17.

Resultado de R12 = 0,32,

Resultado de R16 = 0,32,

Resultado de R17 = 0,32.

4ª etapa:

R11: M e P \rightarrow P,

R12: M e ME \rightarrow ME,

R16: MA e P \rightarrow P,

R17: MA e ME \rightarrow ME.

Produto (P / res. de R11) = Prod (P / 0,32) =
 $\{0,322;0,322;0,322;0,241;0,161;0,080;0;0;0;0\}$,

Produto (ME / res. de R12) = Prod (ME / 0,32) =
 $=\{0;0;0;0,08;0,16;0,24;0,32;0,24;0,16;0,080\}$,

Produto (P / res. de R16) = Prod (P / 0,32) =
 $\{0,322;0,322;0,322;0,241;0,161;0,080;0;0;0;0\}$,

Produto (ME / res. de R17) = Prod (ME / 0,32) =
 $=\{0;0;0;0,080;0,161;0,241;0,322;0,241;0,161;0,080\}$.

5ª etapa:

Os resultados acima serão dispostos em forma de matriz para que possamos mostrar a etapa de agregação, onde a contribuição de cada regra é levada ao resultado geral inferido, ou seja, serão escolhidos os valores *máximos* de cada coluna da matriz.

Tabela 3.2 – Matriz de resultados.

R11	0,322	0,322	0,322	0,241	0,161	0,080	0,000	0,000	0,000	0,000
R12	0,000	0,000	0,000	0,080	0,161	0,241	0,322	0,241	0,161	0,080
R16	0,322	0,322	0,322	0,241	0,161	0,080	0,000	0,000	0,000	0,000
R17	0,000	0,000	0,000	0,080	0,161	0,241	0,322	0,241	0,161	0,080
$\mu_{B'}(u)$	0,322	0,322	0,322	0,241	0,161	0,241	0,322	0,241	0,161	0,080

Na Tabela 3.2, $\mu_{B'}(u)$ é o vetor resultante da inferência fuzzy realizada.

De maneira análoga pode ser feito para os demais procedimentos de inferência fuzzy adotados neste trabalho, seguindo o algoritmo composto de cinco etapas mostrado.

Uma síntese das etapas dos procedimentos de inferência citadas, pode ser vista da seguinte maneira:

max-min \rightarrow (MIN \rightarrow MAX \rightarrow MIN \rightarrow MIN \rightarrow MAX),

max-produto \rightarrow (PRODUTO \rightarrow MAX \rightarrow PRODUTO \rightarrow PRODUTO \rightarrow MAX),

max-min-produto \rightarrow (MIN \rightarrow MAX \rightarrow MIN \rightarrow PRODUTO \rightarrow MAX),

max-produto-min \rightarrow (PRODUTO \rightarrow MAX \rightarrow PRODUTO \rightarrow MIN \rightarrow MAX).

Os procedimentos de lógica fuzzy estudados neste trabalho foram realizados com base na utilização do software Matlab 6.0 (toolbox FIS (Fuzzy Inference System)), o qual possui vários dos diversos procedimentos de lógica fuzzy adotados. Com a finalidade de complementar os procedimentos de lógica fuzzy existentes no Matlab, foi criado um software experimental - sistema computacional PLF, o qual foi implementado em uma estrutura de um sistema computacional utilizando-se o compilador Borland C++ 6.0 builder. O mesmo foi desenvolvido para a implementação de diversos esquemas de inferência fuzzy e diferentes esquemas de defuzzyficação, dentre os quais, alguns deles foram intencionalmente repetidos no PLF com a finalidade de validação do esquema desenvolvido relativamente ao Matlab. A necessidade de implementação do software experimental, além do fato que ele complementa alguns esquemas que o Matlab não contempla, o tratamento da qualidade da inferência fuzzy do ponto de vista da entropia só é possível em função do software experimental nos fornecer o vetor de saída da inferência, o que não ocorre no Matlab.

O código fonte, bem como algumas interfaces gráficas de algumas das principais funções do sistema PLF, são apresentados no *Anexo III*.

Para o sistema de controle desenvolvido (PLF), bem como no Matlab, foram utilizadas regras que correspondem as duas variáveis de entrada (*eficiência de controle e margem*

adequada) para as regras do tipo I e das três variáveis de entrada (*eficiência de controle, margem adequada e incremento de perdas*), para as regras do tipo II. As Tabelas 2.17 a 2.20 contemplam as regras do tipo I, para as regras do tipo II podemos ver as seqüências na seção 2.8.2. para 27 regras e para as demais seqüências, podemos ver no Anexo IV. Para as regras do tipo I, temos 9, 25, 49 e 81 regras para 3, 5, 7 e 9 valores fuzzy respectivamente (para cada uma das duas variáveis lingüísticas de entrada). Para as regras do tipo II, temos 27, 125 e 343 regras para 3, 5 e 7 valores fuzzy, para as três variáveis de entrada (*eficiência de controle, margem adequada e incremento de perdas*).

3.3. Noção de entropia na avaliação da qualidade da inferência fuzzy

Para avaliarmos a qualidade da inferência fuzzy do ponto de vista do grau de nebulosidade, é possível utilizar o conceito de entropia fuzzy, a qual representa medida de incerteza ou nebulosidade de um conjunto fuzzy. Muitos trabalhos foram relacionados aos estudos de entropia fuzzy. Em particular, segundo o trabalho [78], a posição do conjunto fuzzy no hipercubo unitário representa seu grau de nebulosidade, ou seja, se posicionado nos vértices do hipercubo tem entropia zero, enquanto que no ponto médio tem o máximo de entropia, ou seja, entropia 1. Algumas abordagens foram influenciadas pela entropia de Shannon como medida de informação. Particularmente, De Luca e Termini [79] consideram a medida de nebulosidade como sendo um mapeamento d da potência do conjunto $P(x)$ para o intervalo $[0, +\infty]$ satisfazendo um número de condições [79]. Neste trabalho é utilizada a abordagem de De Luca e Termini para os cálculos de entropia.

Vamos considerar $\mu_A(x)$ como sendo a função de pertinência de um conjunto A para $x \in X$, com X finito. É plausível considerar que o grau de nebulosidade $d(A)$ deve então ter as seguintes propriedades [79]:

1. $d(A) = 0$ se A é um conjunto *crisp* em X ;
2. $d(A)$ assume um único máximo se $\mu_A(x) = \frac{1}{2} \forall x \in X$;
3. $d(A) \geq d(A')$ se if A' é mais *crisp* do que A . Por exemplo, $\mu_{A'}(x) \leq \mu_A(x)$ para $\mu_A(x) \leq \frac{1}{2}$ e $\mu_{A'}(x) \geq \mu_A(x)$ para $\mu_A(x) \geq \frac{1}{2}$;

4. $d(CA) = d(A)$, onde CA é o complemento de A .

De Luca e Termini sugeriram como medida de nebulosidade, a “entropia” do conjunto fuzzy [79]. Particularmente, a medida de entropia de um conjunto fuzzy $A = \{(x, \mu_A(x))\}$ foi definida como:

$$d(A) = H(A) + H(CA), \quad x \in X, \quad (3.26)$$

com

$$H(A) = -\frac{1}{K} \sum_{i=1}^n (\mu_A(x_i) \ln(\mu_A(x_i))), \quad (3.27)$$

onde:

n = o número de elementos do suporte de A ,

K = uma constante positiva.

Usando a função de Shannon $S(x) = -x \ln x - (1-x) \ln(1-x)$ [79], e simplificando as expressões (3.26) e (3.27), podemos definir

$$d(A) = K \sum_{i=1}^n S(\mu_A(x_i)), \quad (3.28)$$

que permite apresentar a entropia fuzzy na seguinte maneira:

$$d(A) = -K \sum_{i=1}^n [(\mu_A(x_i) \ln(\mu_A(x_i)) + (1 - \mu_A(x_i)) \ln(1 - \mu_A(x_i)))]. \quad (3.29)$$

A equação (3.29) apresenta a definição para o cálculo da entropia, e sua forma normalizada é dada por :

$$d(A_N) = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\mu_A(x_i) \ln(\mu_A(x_i)) + (1 - \mu_A(x_i)) \ln(1 - \mu_A(x_i)))]. \quad (3.30)$$

As correlações (3.29) e (3.30) foram utilizadas para os cálculos da entropia fuzzy da saída da inferência fuzzy, permitindo assim a análise comparativa entre os métodos de inferência utilizados.

3.4. Cálculo da entropia da saída da inferência

Vamos considerar que os vetores de saída da inferência realizada para cada dispositivo j , sejam os valores da *Tabela 3.3*. Essa tabela contempla os resultados de inferência fuzzy

para regras do tipo I onde temos 5 valores fuzzy para as variáveis lingüísticas, *eficiência de controle, margem adequada e intensidade de utilização*. As funções de pertinência utilizadas para este caso foram: trapezoidais para os valores iniciais e finais, e triangulares para os valores intermediários (detalhes sobre a obtenção destes valores serão mostrados no estudo de caso realizado no capítulo 4).

Temos que:

$$m-m = \text{max-min},$$

$$m-p = \text{max-produto},$$

$$m-m-p = \text{max-min-produto},$$

$$m-p-m = \text{max-produto-min}.$$

Tabela 3.3 – Saída da inferência ($\mu_B(u)$) para todos os dispositivos j .

j	inferência	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	m-m	0,250000	0,344135	0,344135	0,344135	0,344135	0,344135	0,344135	0,344135	0,344135	0,344135	0,250000
	m-p	0,056427	0,112853	0,169280	0,225706	0,169280	0,112853	0,169280	0,225706	0,169280	0,112853	0,056427
	m-m-p	0,086034	0,172067	0,258101	0,344135	0,258101	0,172067	0,258101	0,344135	0,258101	0,172067	0,086034
	m-p-m	0,225706	0,225706	0,225706	0,225706	0,225706	0,225706	0,225706	0,225706	0,225706	0,225706	0,225706
2	m-m	0,322210	0,322210	0,322210	0,322210	0,322210	0,322210	0,322210	0,322210	0,322210	0,250000	0
	m-p	0,053446	0,053446	0,053446	0,040085	0,026723	0,040085	0,053446	0,040085	0,026723	0,013362	0
	m-m-p	0,322210	0,322210	0,322210	0,241658	0,161105	0,241658	0,322210	0,241658	0,161105	0,080552	0
	m-p-m	0,053446	0,053446	0,053446	0,053446	0,053446	0,053446	0,053446	0,053446	0,053446	0,053446	0
3	m-m	0,292915	0,292915	0,292915	0,292915	0,292915	0,292915	0,292915	0,292915	0,292915	0,250000	0
	m-p	0,050531	0,050531	0,050531	0,037898	0,025265	0,037898	0,050531	0,037898	0,025265	0,012633	0
	m-m-p	0,292915	0,292915	0,292915	0,2196863	0,1464575	0,219686	0,292915	0,219686	0,146458	0,073229	0
	m-p-m	0,05031	0,05031	0,05031	0,05031	0,05031	0,05031	0,05031	0,05031	0,05031	0,05031	0
4	m-m	0,170065	0,170065	0,170065	0,170065	0,170065	0,170065	0,170065	0,170065	0,170065	0,170065	0
	m-p	0,023084	0,023084	0,023084	0,017313	0,011542	0,017313	0,023084	0,017313	0,011542	0,005771	0
	m-m-p	0,170065	0,170065	0,170065	0,127549	0,085033	0,127549	0,170065	0,127549	0,085033	0,042516	0
	m-p-m	0,023084	0,023084	0,023084	0,023084	0,023084	0,023084	0,023084	0,023084	0,023084	0,023084	0
5	m-m	0,25	0,5	0,75	1,00	1,00	1,00	0	0	0	0	0
	m-p	0,25	0,5	0,75	1,00	1,00	1,00	0	0	0	0	0
	m-m-p	0,25	0,5	0,75	1,00	1,00	1,00	0	0	0	0	0
	m-p-m	0,25	0,5	0,75	1,00	1,00	1,00	0	0	0	0	0

Será calculada a entropia fuzzy (normalizada), para todos os resultados obtidos através dos diversos procedimentos de inferência fuzzy realizados e seus valores normalizados servirão de base para a análise comparativa entre os procedimentos de inferência, e constam da Tabela 3.4.

Considerando o caso em que temos 5 valores fuzzy para regras do tipo I, será mostrado como calcular o grau de nebulosidade (entropia) da saída da inferência, para o dispositivo $j = 2$, para os procedimentos de inferências:

a) *max-min*

Utilizando-se do vetor resultante da inferência *max-min*, encontrado na *Tabela 3.3* e a equação (3.29):

$$\begin{aligned}
 d(A_N) &= \\
 &= -\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \{0,322210 \ln 0,322210 + [1 - 0,322210] \ln [1 - 0,322210]\} + \{0,322210 \ln 0,322210 + \\
 &[1 - 0,322210] \ln [1 - 0,322210]\} + \{0,322210 \ln 0,322210 + [1 - 0,322210] \ln [1 - 0,322210]\} + \\
 &\{0,322210 \ln 0,322210 + [1 - 0,322210] \ln [1 - 0,322210]\} + \{0,322210 \ln 0,322210 + \\
 &[1 - 0,322210] \ln [1 - 0,322210]\} + \{0,322210 \ln 0,322210 + [1 - 0,322210] \ln [1 - 0,322210]\} + \\
 &\{0,322210 \ln 0,322210 + [1 - 0,322210] \ln [1 - 0,322210]\} + \{0,322210 \ln 0,322210 + \\
 &[1 - 0,322210] \ln [1 - 0,322210]\} + \{0,25 \ln 0,25 + [1 - 0,25] \ln [1 - 0,25]\} = 0,622
 \end{aligned}$$

logo, $d(A_N) = 0,622$.

b) *max-produto*

Utilizando-se do vetor resultante da inferência *max-produto*, encontrado na *Tabela 3.3* e a equação (3.29):

$$\begin{aligned}
 d(A_N) &= \\
 &= -\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \{0,053446 \ln 0,053446 + [1 - 0,053446] \ln [1 - 0,053446]\} + \{0,053446 \ln 0,053446 + \\
 &[1 - 0,053446] \ln [1 - 0,053446]\} + \{0,053446 \ln 0,053446 + [1 - 0,053446] \ln [1 - 0,053446]\} + \\
 &\{0,040085 \ln 0,040085 + [1 - 0,040085] \ln [1 - 0,040085]\} + \{0,026723 \ln 0,026723 + \\
 &[1 - 0,026723] \ln [1 - 0,026723]\} + \{0,040085 \ln 0,040085 + [1 - 0,040085] \ln [1 - 0,040085]\} + \\
 &\{0,053446 \ln 0,053446 + [1 - 0,053446] \ln [1 - 0,053446]\} + \{0,040085 \ln 0,040085 + \\
 &[1 - 0,040085] \ln [1 - 0,040085]\} + \{0,026723 \ln 0,026723 + [1 - 0,026723] \ln [1 - 0,026723]\} + \\
 &\{0,013362 \ln 0,013362 + [1 - 0,013362] \ln [1 - 0,013362]\} = 0,165 \\
 \text{logo, } d(A_N) &= 0,165.
 \end{aligned}$$

c) *max-min-produto*

Utilizando-se do vetor resultante da inferência *max-min-produto*, encontrado na *Tabela 3.3* e a equação (3.29):

$$\begin{aligned}
 d(A_N) &= \\
 &= -\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \{0,322210 \ln(0,322210) + [1 - 0,322210] \ln[1 - 0,322210]\} + \{0,322210 \ln(0,322210) + \\
 &[1 - 0,322210] \ln[1 - 0,322210]\} + \{0,322210 \ln(0,322210) + [1 - 0,322210] \ln[1 - 0,322210]\} + \\
 &\{0,241658 \ln(0,241658) + [1 - 0,241658] \ln[1 - 0,241658]\} + \{0,161105 \ln(0,161105) + \\
 &[1 - 0,161105] \ln[1 - 0,161105]\} + \{0,241658 \ln(0,241658) + [1 - 0,241658] \ln[1 - 0,241658]\} + \\
 &\{0,322210 \ln(0,322210) + [1 - 0,322210] \ln[1 - 0,322210]\} + \{0,241658 \ln(0,241658) + \\
 &[1 - 0,241658] \ln[1 - 0,241658]\} + \{0,161105 \ln(0,161105) + [1 - 0,161105] \ln[1 - 0,161105]\} + \\
 &\{0,080552 \ln(0,080552) + [1 - 0,080552] \ln[1 - 0,080552]\} = 0,534.
 \end{aligned}$$

logo, $d(A_N) = 0,534$.

d) *max-produto-min*

Utilizando-se do vetor resultante da inferência *max-produto-min*, constante da *Tabela 3.3* e a equação (3.29):

$$\begin{aligned}
 d(A_N) &= \\
 &= -\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \{0,053446 \ln(0,053446) + [1 - 0,053446 \ln[1 - 0,053446]]\} + \{0,053446 \ln(0,053446) + \\
 &[1 - 0,053446 \ln[1 - 0,053446]]\} + \{0,053446 \ln(0,053446) + [1 - 0,053446 \ln[1 - 0,053446]]\} + \\
 &\{0,053446 \ln(0,053446) + [1 - 0,053446 \ln[1 - 0,053446]]\} + \{0,053446 \ln(0,053446) + \\
 &[1 - 0,053446 \ln[1 - 0,053446]]\} + \{0,053446 \ln(0,053446) + [1 - 0,053446 \ln[1 - 0,053446]]\} + \\
 &\{0,053446 \ln(0,053446) + [1 - 0,053446 \ln[1 - 0,053446]]\} + \{0,053446 \ln(0,053446) + \\
 &[1 - 0,053446 \ln[1 - 0,053446]]\} + \{0,053446 \ln(0,053446) + [1 - 0,053446 \ln[1 - 0,053446]]\} + \\
 &+ \{0,053446 \ln(0,053446) + [1 - 0,053446 \ln[1 - 0,053446]]\} = 0,209.
 \end{aligned}$$

logo, $d(A_N) = 0,209$.

Baseando em (3.30) as entropias na forma normalizada para todos os dispositivos e seus valores médios ($d_m(A_N)$), foram calculadas e apresentados na *Tabela 3.4*.

Tabela 3.4 – Resultados dos cálculos da entropia fuzzy na forma normalizada, para as inferências, considerando todos os dispositivos j .

Dispositivos (j)	<i>eficiência controle</i>	<i>margem adequada</i>	m-m	m-p	m-m-p	m-p-m
1	0,948429	0,368827	0,629	0,398	0,503	0,534
2	0,614522	0,235558	0,622	0,166	0,534	0,209
3	0,615526	0,241417	0,601	0,159	0,509	0,199
4	0,258804	0,265987	0,456	0,086	0,373	0,110
5	1,000000	1,000000	0,307	0,307	0,307	0,307
$d_m(A_N)$	-	-	0,523	0,223	0,445	0,272

De acordo com os valores médios ($d_m(A_N)$) de entropia obtidos na tabela acima, podemos observar que o procedimento de inferência *max-produto* mostra melhores resultados do ponto de vista de entropia, seguido dos procedimentos de inferência *max-produto-min*, *max-min-produto* e finalmente *max-min*. Podemos observar também que para valores das entradas próximos da fronteira, os quais não possuem interseção com outra função de pertinência, seu resultado de entropia mostrou ser um valor constante, independentemente do procedimento de inferência fuzzy adotado.

CAPÍTULO 4

DEFUZZYFICAÇÃO: ESQUEMAS E SEUS ESTUDOS

4.1. Defuzzyficação

A defuzzyficação é o processo no qual o valor da variável lingüística de saída inferida pelas regras fuzzy será traduzido num valor discreto. O objetivo é obter um único valor numérico discreto que melhor represente os valores fuzzy inferidos da variável lingüística de saída. Assim, a defuzzyficação é uma transformação inversa que traduz a saída do domínio fuzzy para o domínio discreto, e que pode ser considerada como a saída do sistema de controle fuzzy [26],[27],[45],[53].

Os métodos de defuzzyficação, mais freqüentemente usados são baseados na noção do centróide ou na utilização dos valores máximos que ocorrem na função de pertinência resultante [27],[53],[74],[80],[81]: os métodos Centro de Área, Centro da Soma, Centro dos Máximos e o método Média dos Máximos. Além disso, podem ser encontrados outros métodos de defuzzyficação [82],[83]: Bissetor de Área, Menor dos Máximos, Último dos Máximos. Esses métodos são considerados e estudados nesse capítulo.

4.1.1. Defuzzyficação centro de área

O método Centro de Área (CA) é freqüentemente chamado de método do centro de gravidade, de acordo com [27],[53],[55],[74],[80],[81] é o método mais utilizado. Neste método se calcula o centróide da área composta que representa o termo de saída fuzzy ($\mu_B(u_i)$), toma a abscissa da coordenada do centróide. Este termo de saída fuzzy é composto pela união de todas as contribuições das regras. O centróide é um ponto que divide a área de $\mu_B(u_i)$ em duas partes iguais. O cálculo do centróide da área da figura resultante do processo de inferência se dá da seguinte forma:

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \mu_B(u_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_B(u_i)}, \quad (4.1)$$

Onde:

u_i = abscissa (discretização) no ponto i ,

$\mu_{B'}(u_i)$ = função de pertinência da saída da inferência para os valores de u_i .

A utilização do método do CA apresenta alguns problemas [27],[53]. Particularmente, um deles ocorre quando as funções de pertinência não possuem sobreposição, onde o centro geométrico da figura não possui significado físico. Um outro fator é que se a saída fuzzy das regras provocar sobreposição de áreas, esta sobreposição não é devidamente contabilizada (área com interseção são contadas apenas uma vez).

4.1.2. Defuzzyficação centro da soma

Para resolver os problemas associados com CA e levar em conta a interseção das áreas de múltiplas regras mais de uma vez, uma variante do método CA chamado o método Centro da Soma (CS) pode ser usado. O método CS constrói a função de pertinência resultante tomando a soma (não só a união) da saída de cada contribuição de cada regra. Conseqüentemente as áreas da interseção são contadas mais de uma vez (o contrário do que ocorre com o CA). Segundo [53], o método CS é de fato o método de defuzzyficação mais utilizado. Ele pode ser implementado facilmente e conduz a ciclos conclusivos bastante rápidos [53]. Particularmente, podendo ser obtido por:

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \sum_{k=1}^n \mu_{B_k'}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n \mu_{B_k'}(u_i)} \quad (4.2)$$

Onde:

$\mu_{B_k'}(u_i)$ = a função de pertinência (no ponto u_i do universo de discurso) resultante da contribuição da k ésima regra.

4.1.3. Defuzzyficação bisetor de área

O método Bissetor de Área (BA), leva em consideração o ponto de encontro das bissetrizes (baricentro) dos ângulos internos da função de pertinência resultante do processo de inferência (ver *Figura 4.1*). Os resultados proporcionados por este método, são muito próximos dos resultados proporcionados pelo método CA [82].

A Figura abaixo ilustra todos os métodos de defuzzyficação estudados nesse trabalho. O caso aplicado foi o que utilizamos a inferência *max-min* para regras do tipo I, utilizando cinco valores fuzzy para todas as variáveis linguísticas e funções de pertinência trapezoidais para valores iniciais e finais e triangulares para valores intermediários (*Tabela 4.10*).

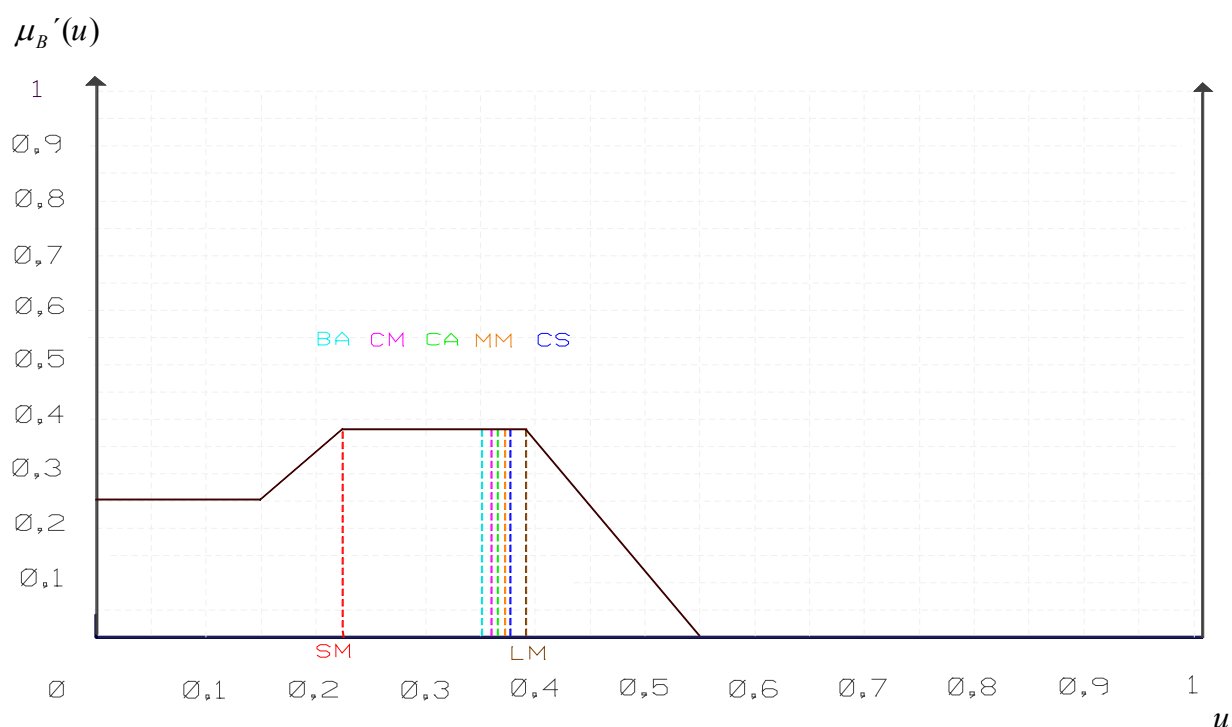


Figura 4.1 – Aplicação dos sete (7) métodos de defuzzyficação (SM, BA, CM, CA, MM, CS e LM) na saída da inferência fuzzy.

4.1.4. Defuzzyficação centro dos máximos

Usando o método de Centro dos Máximos (CM), os picos das funções de pertinência representadas no universo de discurso da variável de saída são usados, enquanto ignora-se as áreas das funções de pertinência; as contribuições múltiplas de regras são consideradas

por este método. Assumindo que estes picos representam pesos, o valor de saída defuzzyficado, discreto, é determinado achando-se o ponto de apoio onde os pesos ficam equilibrados [27],[55]. Assim as áreas das funções de pertinência não desempenham nenhum papel e apenas os máximos são usados. A saída discreta é calculada como uma média ponderada dos máximos, cujos pesos são os resultados da inferência. O cálculo do valor realizado é obtido através da seguinte correlação [27],[55]:

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \sum_{k=1}^n \mu_{O,k}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n \mu_{O,k}(u_i)} \quad (4.3)$$

Onde:

$\mu_{O,k}(u_i)$ = a função de pertinência máxima (no ponto u_i do universo de discurso) resultante da contribuição da k ésima regra [27].

4.1.5. Defuzzyficação média dos máximos

Quando utilizado o método média dos máximos (MM), teríamos uma maneira simples de defuzzyficar a saída, tomando o valor crisp (abscissa) com o maior grau de pertinência em $\mu_{B'}(u_i)$. Seria simples, mas muitas das vezes podemos ter mais de um elemento no universo de discurso, que tenha valor de pertinência máximo. Neste caso nos podemos seleccionar um deles randomicamente, ou, ainda melhor, tomar a media dos máximos (MM) [27],[53],[55],[74]. Suponhamos que temos M valores como máximo em um universo discreto de discurso. A saída crisp pode ser obtida por:

$$u^* = \sum_{m=1}^M \frac{u_i}{M} \quad (4.4)$$

Onde:

u_i = o i ésimo elemento do universo de discurso onde a função de pertinência $\mu_{B'}(u_i)$ é o valor máximo,

M = o número total de tais elementos.

É natural, que este método seja mais rápido do que o CA. A desvantagem dele se dá pelo fato de não ser considerada toda a forma da saída fuzzy $\mu_{B'}(u_i)$, embora ambos veem sendo largamente utilizados em aplicações de sistemas de controle [27],[53].

É necessário indicar que tanto o método CM quanto o MM trazem dificuldades na escolha dos máximos que devem ser considerados para os cálculos.

4.1.6. Defuzzyficação menor dos máximos

Na utilização do método de defuzzyficação Menor dos Máximos (SM), é escolhido o *primeiro* elemento do universo de discurso (u_i) onde a função de pertinência é máxima [83] (ver *Figura 4.1*).

4.1.7. Defuzzyficação último dos máximos

Na utilização do método de defuzzyficação Último dos Máximos (LM), é considerado o *último* elemento do universo de discurso (u_i) onde a função de pertinência é máxima [83], (ver *Figura 4.1*).

4.2. Estudo de caso

Nesta seção realizaremos um estudo de caso, cujo objetivo é mostrar as fases do processo de controle fuzzy, a ser aplicado ao controle de tensão e potencia reativa no subsistema de potencia em análise.

Como citado anteriormente, a barra controlada, considerada para este estudo foi a barra $i = 964$. Todo o estudo foi embasado nos valores da *Tabela 2.16* (valores de entrada das variáveis lingüísticas, *eficiência de controle*, *margem adequada* e *incremento de perdas*).

Para o caso em estudo mostraremos as fases do controle, utilizando regras do tipo I, onde temos cinco valores fuzzy para as variáveis lingüísticas de entrada *eficiência de controle*,

margem adequada e de saída *intensidade de utilização*, para o dispositivo de controle $j = 2$.

4.2.1. Fuzzyficação dos valores das variáveis de entrada

Na fuzzyficação, para o estudo de caso serão utilizadas as funções de pertinência trapezoidais para os valores das extremidades, e triangulares para os valores intermediários, conforme ilustrado na *Figura 2.7*.

- Por exemplo, para o dispositivo $j = 2$ temos os seguintes valores de entrada:
eficiência de controle = 0,614522,
margem adequada = 0,235558 .
- Depois de fuzzyficados ficam:
eficiência de controle: $\mu([S_{964,2}^V]) = 0,427390$ (M) e 0,572610 (MA),
margem adequada: $\mu(m_2) = 0,322210$ (P) e 0,677790 (ME).

4.2.2. Inferência fuzzy para o caso em estudo

Para mostrar a inferência fuzzy no caso em estudo, será utilizado o esquema *max-min* de Mamdani.

Durante a fase de inferência, serão considerados:

eficiência de controle = ECO,
margem adequada = MAD.

- Para o dispositivo $j = 2$:
De acordo com os valores de entrada para *eficiência de controle*: $\mu([S_{964,2}^V]) = 0,427390$ (M) e 0,572610 (MA) e *margem adequada*: $\mu(m_2) = 0,322210$ (P) e 0,677790 (ME), as regras ativadas são:

R11: M e P \rightarrow P,
R12: M e ME \rightarrow ME,
R16: MA e P \rightarrow P,
R17: MA e ME \rightarrow ME .

Uma vez definidas as regras que serão ativadas de acordo com as entradas fuzzyficadas, serão efetuados os cálculos utilizando-se o *Poss* para os antecedentes de cada regra, para cada variável de entrada. Como se está trabalhando com o modelo *max-min* de Mamdani, no *Poss*, será feito a comparação do valor da entrada com cada elemento do vetor de possibilidades correspondente, gerando um vetor contendo o mínimo entre cada comparação feita. Neste vetor contendo os mínimos, será escolhido o máximo entre eles. Este procedimento gerará um único valor para cada linha de *Poss*, no final da análise para aquela regra será escolhido o mínimo entre os *Poss* da regra em análise, conforme mostrado abaixo.

Tabela 4.1 – Vetores de possibilidades.

u_i	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1	
P	1	1	1	0,75	0,5	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ME	0	0	0	0,25	0,5	0,75	1	0,75	0,5	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,5	0,75	1	0,75	0,5	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0
MA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,5	0,75	1	0,75	0,5	0,25	0	0	0	0
G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,5	0,75	1	1	1	1

Obs: Os vetores de possibilidades para cada valor fuzzy na tabela acima, são obtidos considerando as faixas de base para cada valor fuzzy e a função de pertinência correspondente.

R11: para ECO

Poss (M / ECO) :

Poss (M / M) = Poss (M / 0,427390) = 0,427390,

Poss (M / MA) = Poss (M / 0,572610) = 0,572610.

Obs: o “M” utilizado no “Poss (M / 0,427390)” é o vetor de possibilidades para o valor fuzzy M e assim sucessivamente.

R11: para MAD

Poss (P / MAD) :

Poss (P / P) = Poss (P / 0,322210) = 0,322210,

Poss (P / ME) = Poss (P / 0,677790) = 0,677790.

Resultado de R11: 0,322210.

R12: para ECO

Poss (M / ECO) :

$$\text{Poss (M / M)} = \text{Poss (M / 0,427390)} = 0,427390,$$

$$\text{Poss (M / MA)} = \text{Poss (M / 0,572610)} = 0,572610.$$

R12: para MAD

Poss (ME / MAD) :

$$\text{Poss (ME / P)} = \text{Poss (ME / 0,322210)} = 0,322210,$$

$$\text{Poss (ME / ME)} = \text{Poss (ME / 0,677790)} = 0,677790.$$

Resultado de R12: 0,322210

R16: para ECO

Poss (MA / ECO) :

$$\text{Poss (MA / M)} = \text{Poss (MA / 0,427390)} = 0,427390,$$

$$\text{Poss (MA / MA)} = \text{Poss (MA / 0,572610)} = 0,572610.$$

R16: para MAD

Poss (P / MAD) :

$$\text{Poss (P / P)} = \text{Poss (P / 0,322210)} = 0,322210,$$

$$\text{Poss (P / ME)} = \text{Poss (P / 0,677790)} = 0,677790.$$

Resultado de R16: 0,322210

R17: para ECO

Poss (MA / ECO) :

$$\text{Poss (MA / M)} = \text{Poss (MA / 0,427390)} = 0,427390,$$

$$\text{Poss (MA / MA)} = \text{Poss (MA / 0,572610)} = 0,572610.$$

R17: para MAD

Poss (ME / MAD) :

$$\text{Poss (ME / P)} = \text{Poss (ME / 0,322210)} = 0,322210,$$

$$\text{Poss (ME / ME)} = \text{Poss (ME / 0,677790)} = 0,677790.$$

Resultado de R16: 0,322210.

Os cálculos para os consequentes das regras, serão efetuados a seguir.

Nesta fase, será feita a comparação entre o resultado da regra r e o vetor de possibilidades relativo ao conseqüente desta regra, sendo escolhido os mínimos de cada comparação, e assim sucessivamente. Este procedimento gerará um vetor de mínimos para cada regra, cujos valores para o caso em estudo constam da *Tabela 4.2*.

$$R11: M \text{ e } P \rightarrow P,$$

$$R12: M \text{ e } ME \rightarrow ME,$$

$$R16: MA \text{ e } P \rightarrow P,$$

$$R17: MA \text{ e } ME \rightarrow ME.$$

$$\text{MIN}(P / \text{resultado de R11}) = \text{MIN}(P / 0,322210) = \text{Vetor de R11},$$

$$\text{MIN}(ME / \text{resultado de R12}) = \text{MIN}(ME / 0,322210) = \text{Vetor de R12},$$

$$\text{MIN}(P / \text{resultado de R16}) = \text{MIN}(P / 0,322210) = \text{Vetor de R16},$$

$$\text{MIN}(ME / \text{resultado de R17}) = \text{MIN}(ME / 0,322210) = \text{Vetor de R17}.$$

Tabela 4.2 – Vetores de saída com a contribuição de cada regra para o dispositivo x_2 ($\mu_{B_k}(u_i)$).

Vetor de R11	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,25000	0	0	0	0
Vetor de R12	0	0	0	0,25	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,25000
Vetor de R16	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,25000	0	0	0	0
Vetor de R17	0	0	0	0,25	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,25000
$\mu_{B'}(u)$	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,32221	0,25000

Uma vez de posse dos vetores de saída de cada regra, será necessário fazer o processo de agregação. Nessa fase, é necessário comparar os elementos, considerando a matriz na vertical (coluna), escolhendo o máximo entre esses valores, para todas as colunas. Os resultados desta fase de agregação é o vetor ($\mu_{B'}(u)$). A *Tabela 3.3* contempla os resultados para cada procedimento de inferência realizado.

Após a saída da inferência (*Tabela 3.3*), os vetores $\mu_{B'}(u)$ serão levados para processo de defuzzyficação e são fundamentais para o cálculo da medida de entropia (grau de nebulosidade da saída da inferência).

4.2.3. Defuzzyficação dos resultados da inferência

Utilizando as equações para todos os métodos de defuzzyficação da seção 4.1, a saída da inferência é utilizada para obtenção da variável de saída do sistema de controle fuzzy, *intensidade de utilização* (u^*). Os resultados defuzzyficados para o caso em estudo são contemplados na *Tabela 4.10*.

4.3. Descrição dos experimentos realizados

A seguir serão feitas breves descrições de todos os experimentos realizados de acordo com cada esquema de defuzzyficação utilizado, bem como as variações no tipo de regras (I e II), número de regras, valores fuzzy e funções de pertinência.

Os experimentos realizados no software Matlab contemplam os esquemas de inferência *max-min* e *max-produto* e de defuzzyficação, CA, BA, MM, LM e SM (*Tabelas de 4.3. a 4.9 e 4.12 a 4.52*). Os experimentos realizados no PLF, contemplam os esquemas de inferência *max-min*, *max-produto*, *max-min-produto* e *max-produto-min* e de defuzzyficação, CA, MM, CS e CM (*Tabelas de 4.10 e 4.11*).

a) Regras do Tipo I

Foram realizados experimentos considerando:

- 3 valores fuzzy para cada variável lingüística, e conseqüentemente 9 regras da base de conhecimento foram utilizadas: As funções de pertinência inicialmente utilizadas foram trapezoidais (trap), para valores iniciais e finais e triangulares (tri), para valores intermediários. O esquema de inferência utilizado foi *max-min* e *max-produto*. Os resultados para estes experimentos foram obtidos utilizando o Matlab e seus resultados constam da *Tabela 4.3*. Uma pequena variação desse caso foi conseguida mantendo as mesmas condições dos experimentos anteriores e aumentando a faixa dos valores das funções de pertinência cujos resultados constam da *Tabela 4.4*. Outra situação abordada foi a variação na simetria das

funções de pertinência, mantendo as mesmas condições iniciais, seus resultados se encontram na *Tabela 4.5*. Na *Tabela 4.6*, temos resultados considerando apenas variações na função de pertinência dos valores intermediários, que agora utilizamos a função de pertinência gaussiana (gauss), mantendo trapezoidais para os valores iniciais e finais. O mesmo acontece para a *Tabela 4.7*, onde foram utilizadas para todos os valores, a função de pertinência gaussiana. Outras variações nas funções de pertinência, são contempladas na *Tabela 4.8*, onde temos para todas os valores a função de pertinência trapezoidal. Na *Tabela 4.9*, temos também variações nas funções de pertinência, desta vez temos funções de pertinência trapezoidais para valores iniciais e finais e sigmoidais (sigm) para valores intermediários.

- 5 valores fuzzy para cada variável lingüística, e conseqüentemente 25 regras da base de conhecimento foram utilizadas: As funções de pertinência inicialmente utilizadas foram trapezoidais, para valores iniciais e finais e triangulares, para valores intermediários. O esquema de inferência utilizado foi *max-min*, *max-produto*, *max-min-produto* e *max-produto-min*. Os resultados para estes experimentos foram obtidos utilizando o software PLF e o Matlab. Seus resultados constam da *Tabela 4.10* e *4.11*. Uma pequena variação desse caso foi conseguida mantendo as mesmas condições dos experimentos anteriores, porem utilizando inferência *max-min* e *max-produto*, e aumentando a faixa dos valores das funções de pertinência cujos resultados constam da *Tabela 4.12*. Outra situação abordada foi a variação na simetria das funções de pertinência, mantendo as mesmas condições iniciais, porem utilizando inferência *max-min* e *max-produto*. Seus resultados se encontram na *Tabela 4.13*. Na *Tabela 4.14*, temos resultados considerando apenas variações na função de pertinência dos valores intermediários, que agora utilizamos a função de pertinência gaussiana, mantendo trapezoidais para os valores iniciais e finais. O mesmo acontece para a *Tabela 4.15*, onde foram utilizadas para todos os valores, a função de pertinência gaussiana. Outras variações nas funções de pertinência, são contempladas na *Tabela 4.16*, onde temos para todas os valores a função de pertinência trapezoidal. Na *Tabela 4.17*, temos também variações nas funções de pertinência, desta vez temos funções de pertinência trapezoidais para valores iniciais e finais e sigmoidais para valores intermediários.

- 7 valores fuzzy para cada variável lingüística, e conseqüentemente 49 regras da base de conhecimento foram utilizadas: As funções de pertinência inicialmente utilizadas foram trapezoidais, para valores iniciais e finais e triangulares, para valores intermediários. O esquema de inferência utilizado foi *max-min* e *max-produto*. Os resultados para estes experimentos foram obtidos utilizando o Matlab e seus resultados constam da *Tabela 4.18*. Uma pequena variação desse caso foi conseguida mantendo as mesmas condições dos experimentos anteriores e aumentando a faixa dos valores das funções de pertinência cujos resultados constam da *Tabela 4.19*. Outra situação abordada foi a variação na simetria das funções de pertinência, mantendo as mesmas condições iniciais, seus resultados se encontram na *Tabela 4.20*. Na *Tabela 4.21*, temos resultados considerando apenas variações na função de pertinência dos valores intermediárias, que agora utilizamos a função de pertinência gaussiana, mantendo trapezoidais para os valores iniciais e finais. O mesmo acontece para a *Tabela 4.22*, onde foram utilizadas para todos os valores, a função de pertinência gaussiana. Outras variações nas funções de pertinência, são contempladas na *Tabela 4.23*, onde temos para todas os valores a função de pertinência trapezoidal. Na *Tabela 4.24*, temos também variações nas funções de pertinência, desta vez temos funções de pertinência trapezoidais para valores iniciais e finais e sigmoidais para valores intermediários.
- 9 valores fuzzy para cada variável lingüísticas, e conseqüentemente 81 regras da base de conhecimento foram utilizadas: As funções de pertinência inicialmente utilizadas foram trapezoidais, para valores iniciais e finais e triangulares, para valores intermediários. O esquema de inferência utilizado foi *max-min* e *max-produto*. Os resultados para estes experimentos foram obtidos utilizando o Matlab e seus resultados constam da *Tabela 4.25*. Uma pequena variação desse caso foi conseguida mantendo as mesmas condições dos experimentos anteriores e aumentando a faixa dos valores das funções de pertinência cujos resultados constam da *Tabela 4.26*. Outra situação abordada foi a variação na simetria das funções de pertinência, mantendo as mesmas condições iniciais, seus resultados se encontram na *Tabela 4.27*. Na *Tabela 4.28*, temos resultados considerando apenas variações na função de pertinência dos valores intermediários, que agora utilizamos a função de pertinência gaussiana, mantendo trapezoidais para os valores iniciais e

finais. O mesmo acontece para a *Tabela 4.29*, onde foram utilizadas para todos os valores, a função de pertinência gaussiana. Outras variações nas funções de pertinência, são contempladas na *Tabela 4.30*, onde temos para todas os valores a função de pertinência trapezoidal. Finalmente na *Tabela 4.31*, temos também variações nas funções de pertinência, desta vez temos funções de pertinência trapezoidais para valores iniciais e finais e sigmoidais para valores intermediários.

b) Regras do Tipo II

- 3 valores fuzzy para as variáveis lingüísticas de entrada *eficiência de controle*, *margem adequada* e *incremento de perdas* e de saída *intensidade de utilização* (27 regras): inicialmente utilizamos funções de pertinência trapezoidais, para valores iniciais e finais e triangulares, para valores intermediários. Inferência *max-min* e *max-produto*. Os resultados para estes experimentos foram obtidos utilizando o Matlab e seus resultados constam da *Tabela 4.32*. Uma pequena variação desse caso foi conseguida mantendo as mesmas condições dos experimentos anteriores e aumentando a faixa dos valores das funções de pertinência cujos resultados constam da *Tabela 4.33*. Outra situação abordada foi a variação na simetria das funções de pertinência, mantendo as mesmas condições iniciais, seus resultados se encontram na *Tabela 4.34*. Na *Tabela 4.35*, temos resultados considerando apenas variações na função de pertinência dos valores intermediários, que agora utilizamos a função de pertinência gaussiana, mantendo trapezoidais para os valores iniciais e finais. O mesmo acontece para a *Tabela 4.36*, onde foram utilizadas para todos os valores, a função de pertinência gaussiana. Outras variações nas funções de pertinência, são contempladas na *Tabela 4.37*, onde temos para todas os valores a função de pertinência trapezoidal. Na *Tabela 4.38*, temos também variações nas funções de pertinência, desta vez temos funções de pertinência trapezoidais para valores iniciais e finais e sigmoidais para valores intermediários.
- 5 valores fuzzy para as variáveis lingüísticas de entrada *eficiência de controle*, *margem adequada* e *incremento de perdas* e de saída *intensidade de utilização* (125 regras): inicialmente utilizamos funções de pertinência trapezoidais, para valores iniciais e finais e triangulares, para valores intermediários. Inferência *max-min* e

max-produto. Os resultados para estes experimentos foram obtidos utilizando o Matlab e seus resultados constam da *Tabela 4.39*. Uma pequena variação desse caso foi conseguida mantendo as mesmas condições dos experimentos anteriores e aumentando a faixa dos valores das funções de pertinência cujos resultados constam da *Tabela 4.40*. Outra situação abordada foi a variação na simetria das funções de pertinência, mantendo as mesmas condições iniciais, seus resultados se encontram na *Tabela 4.41*. Na *Tabela 4.42*, temos resultados considerando apenas variações na função de pertinência dos valores intermediários, que agora utilizamos a função de pertinência gaussiana, mantendo trapezoidais para os valores iniciais e finais. O mesmo acontece para a *Tabela 4.43*, onde foram utilizadas para todos os valores, a função de pertinência gaussiana. Outras variações nas funções de pertinência, são contempladas na *Tabela 4.44*, onde temos para todas os valores a função de pertinência trapezoidal. Na *Tabela 4.45*, temos também variações nas funções de pertinência, desta vez temos funções de pertinência trapezoidais para valores iniciais e finais e sigmoidais para valores intermediários.

- 7 valores fuzzy para as variáveis lingüísticas de entrada *eficiência de controle*, *margem adequada* e *incremento de perdas* e de saída *intensidade de utilização* (343 regras): inicialmente utilizamos funções de pertinência trapezoidais, para valores iniciais e finais e triangulares, para valores intermediários. Inferência *max-min* e *max-produto*. Os resultados para estes experimentos foram obtidos utilizando o Matlab e seus resultados constam da *Tabela 4.46*. Uma pequena variação desse caso foi conseguida mantendo as mesmas condições dos experimentos anteriores e aumentando a faixa dos valores das funções de pertinência cujos resultados constam da *Tabela 4.47*. Outra situação abordada foi a variação na simetria das funções de pertinência, mantendo as mesmas condições iniciais, seus resultados se encontram na *Tabela 4.48*. Na *Tabela 4.49*, temos resultados considerando apenas variações na função de pertinência dos valores intermediários, que agora utilizamos a função de pertinência gaussiana, mantendo trapezoidais para os valores iniciais e finais. O mesmo acontece para a *Tabela 4.50*, onde foram utilizadas para todos os valores, a função de pertinência gaussiana. Outras variações nas funções de pertinência, são contempladas na *Tabela 4.51*, onde temos para todas os valores a função de pertinência trapezoidal. Na *Tabela 4.52*, temos também variações nas

funções de pertinência, desta vez temos funções de pertinência trapezoidais para valores iniciais e finais e sigmoidais para valores intermediários.

Para regras do tipo II, não foram realizados experimentos para 9 valores fuzzy em função das dificuldades relacionadas com a elaboração manual de 729 regras, o que pode ser considerado natural, em função desse número ser relativamente alto e da necessidade de confiabilidade em termos de qualidade das regras geradas manualmente.

É importante ressaltar que para aqueles experimentos onde tivemos aumento na faixa da base da função de pertinência e na variação de sua simetria, consideramos 70% de sobreposição das funções de pertinências. Mostraremos abaixo um resumo das variações efetuadas, em termos de função de pertinência e sobreposição:

trap-tri-trap – 50% de sobreposição;

trap-tri-trap – aumentando a faixa dos valores das funções de pertinências (70% de sobreposição);

trap-tri-trap – variando a simetria das funções de pertinências (70% de sobreposição);

trap-gauss-trap – 50% de sobreposição;

gauss-gauss-gauss – 50% de sobreposição;

trap-trap-trap - 50% de sobreposição.

trap-sigm-trap - 50% de sobreposição.

4.4. Elaboração da saída do sistema de controle

Agora mostraremos de maneira sucinta, como é possível utilizar os valores de *intensidade de utilização* u_j^* , $j=1, \dots, J$, obtidos após a defuzzyficação, para elaborar as ações (contínuas) de controle, associadas com os dispositivos reais de regulação e compensação j [60].

Admitimos, que os valores u^* , $j=1, \dots, J$ foram obtidos considerando-se a necessidade de eliminar a violação ΔR de qualquer restrição (ΔR_i se temos uma violação da restrição no nível de tensão da correspondente barra i do sistema ou ΔR_k se temos uma violação da restrição na capacidade de potência do correspondente elemento k da rede). Esses valores,

utilizando o princípio de proporcionalidade de ações de controle [16], podem dar a possibilidade de estimar os incrementos necessários para as variáveis de controle da seguinte maneira:

$$\Delta x_j = x'_j - x_j^e = \frac{1}{S_{ij}^V} \Delta R_i \frac{u_j^*}{\sum_{j=1}^J u_j^*}, \quad (4.5)$$

ou

$$\Delta x_j = x'_j - x_j^e = \frac{1}{S_{kj}^S} \Delta R_k \frac{u_j^*}{\sum_{j=1}^J u_j^*} \quad (4.6)$$

se for necessário aumentar o nível da variável de controle relativamente ao nível existente x_j^e , ou

$$\Delta x_j = x_j^e - x'_j = \frac{1}{|S_{ij}^V|} \Delta R_i \frac{u_j^*}{\sum_{j=1}^J u_j^*}, \quad (4.7)$$

ou

$$\Delta x_j = x_j^e - x'_j = \frac{1}{|S_{kj}^S|} \Delta R_k \frac{u_j^*}{\sum_{j=1}^J u_j^*} \quad (4.8)$$

se for necessário diminuir o nível da variável de controle relativamente ao nível existente x_j^e .

Onde:

Δx_j = incrementos necessários para os dispositivos de controle j ,

x_j^e = nível de tensão existente nos dispositivos de controle j ,

x'_j = valor calculado (tensão ou potência) que deverá ser aplicado no dispositivo de controle j , para resolver a violação existente,

S_{ij}^V = coeficiente de sensibilidade de tensão,

S_{kj}^S = coeficiente de sensibilidade de potência aparente,

ΔR_i = violação a ser corrigida,

u_j^* = valor fuzzy obtido após defuzzyficação para o dispositivo j .

Se para todas as variáveis, que devem aumentar seus valores, é observada a correlação

$$x'_j \leq \bar{x}_j \quad (4.9)$$

e para todas as variáveis, que devem diminuir seus valores, é observada a correlação

$$x'_j \geq \underline{x}_j, \quad (4.10)$$

então a solução $x'_j, j=1, \dots, J$ pode ser aceita como a saída do sistema de controle.

No caso, em que para a variável arbitrária r não é observada a condições (4.9) ou a condição (4.10), então esta variável é fixada no nível \bar{x}_r (limite superior) ou no nível \underline{x}_r (limite inferior), respectivamente, com o cálculo correspondente do valor da violação ΔR^1

$$\Delta R_i^1 = \Delta R_i - |S_{ir}^v| \Delta x_r, \quad (4.11)$$

se corrigimos o nível de tensão da barra i ou

$$\Delta R_k^1 = \Delta R_k - |S_{kr}^s| \Delta x_r, \quad (4.12)$$

se corrigimos o nível de carga do elemento k da rede.

É natural, que a necessidade de corrigir ΔR para todas as variáveis de controle, significa que a solução do problema não pode ser alcançada.

Depois a correção (correções) de acordo com (4.11) ou (4.12), os cálculos dos incrementos necessários das variáveis de controle podem ser realizados com base nas correlações (4.5) ou (4.6) ou nas correlações (4.7) ou (4.8) para $j=1, \dots, r-1, r+1, \dots, J$.

Um exemplo para o cálculo da saída do sistema de controle é mostrado no *Anexo IV*.

As tabelas a seguir contemplam os resultados de defuzzyficação para todos os experimentos realizados:

a) Resultados defuzzyficados para as regras do tipo I:

Tabela 4.3 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação - (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,435	0,450	0,500	0,630	0,370	0,415	0,440	0,500	0,500	0,500
2	0,614522	0,235558	0,338	0,280	0,125	0,250	0,000	0,284	0,230	0,075	0,150	0,000
3	0,615526	0,241417	0,341	0,280	0,125	0,250	0,000	0,290	0,230	0,075	0,150	0,000
4	0,258804	0,265987	0,356	0,310	0,130	0,260	0,000	0,266	0,210	0,075	0,150	0,090
5	1,000000	1,000000	0,825	0,840	0,925	1,000	0,850	0,825	0,840	0,925	1,000	0,850

Tabela 4.4 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – aumentando a faixa dos valores da função de pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,446	0,450	0,500	0,630	0,370	0,427	0,440	0,500	0,500	0,500
2	0,614522	0,235558	0,388	0,340	0,125	0,250	0,000	0,335	0,280	0,075	0,150	0,000
3	0,615526	0,241417	0,390	0,340	0,125	0,250	0,000	0,339	0,290	0,075	0,150	0,000
4	0,258804	0,265987	0,398	0,360	0,130	0,260	0,000	0,318	0,260	0,075	0,150	0,000
5	1,000000	1,000000	0,793	0,810	0,925	1,000	0,850	0,793	0,810	0,925	1,000	0,850

Tabela 4.5 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a simetria da função de pertinência - (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência Max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,493	0,460	0,325	0,360	0,290	0,496	0,460	0,300	0,300	0,300
2	0,614522	0,235558	0,407	0,400	0,390	0,550	0,230	0,377	0,360	0,300	0,300	0,300
3	0,615526	0,241417	0,411	0,400	0,390	0,550	0,230	0,385	0,370	0,300	0,300	0,300
4	0,258804	0,265987	0,421	0,410	0,350	0,440	0,260	0,402	0,390	0,300	0,300	0,300
5	1,000000	1,000000	0,728	0,760	0,925	1,000	0,850	0,728	0,760	0,925	1,000	0,850

Tabela 4.6 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (trap-gauss-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,440	0,460	0,500	0,630	0,370	0,428	0,450	0,500	0,500	0,500
2	0,614522	0,235558	0,327	0,260	0,115	0,230	0,000	0,279	0,220	0,075	0,150	0,000
3	0,615526	0,241417	0,333	0,270	0,120	0,240	0,000	0,285	0,230	0,075	0,150	0,000
4	0,258804	0,265987	0,353	0,300	0,130	0,260	0,000	0,259	0,200	0,075	0,150	0,000
5	1,000000	1,000000	0,813	0,840	0,925	1,000	0,850	0,821	0,840	0,925	1,000	0,850

Tabela 4.7 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,440	0,460	0,500	0,630	0,370	0,430	0,450	0,500	0,500	0,500
2	0,614522	0,235558	0,325	0,260	0,115	0,230	0,000	0,280	0,220	0,090	0,090	0,090
3	0,615526	0,241417	0,331	0,270	0,120	0,240	0,000	0,286	0,230	0,090	0,090	0,090
4	0,258804	0,265987	0,351	0,300	0,130	0,260	0,000	0,259	0,210	0,090	0,090	0,090
5	1,000000	1,000000	0,798	0,820	0,910	1,000	0,820	0,810	0,830	0,910	0,910	0,910

Tabela 4.8 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (trap-trap-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,428	0,450	0,500	0,630	0,370	0,415	0,450	0,500	0,540	0,460
2	0,614522	0,235558	0,312	0,250	0,115	0,230	0,000	0,272	0,220	0,075	0,150	0,000
3	0,615526	0,241417	0,319	0,260	0,120	0,240	0,000	0,279	0,230	0,075	0,150	0,000
4	0,258804	0,265987	0,340	0,290	0,130	0,260	0,000	0,256	0,200	0,075	0,150	0,000
5	1,000000	1,000000	0,825	0,840	0,925	1,000	0,850	0,825	0,840	0,925	1,000	0,850

Tabela 4.9 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (trap-sigm-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,560	0,580	0,685	1,000	0,370	0,575	0,600	1,000	1,000	1,000
2	0,614522	0,235558	0,390	0,300	0,115	0,230	0,000	0,396	0,300	0,075	0,150	0,000
3	0,615526	0,241417	0,399	0,310	0,120	0,240	0,000	0,406	0,320	0,075	0,150	0,000
4	0,258804	0,265987	0,430	0,370	0,130	0,260	0,000	0,365	0,260	0,075	0,150	0,000
5	1,000000	1,000000	0,640	0,650	0,925	1,000	0,850	0,640	0,650	0,925	1,000	0,850

Tabela 4.10 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída													
			Intensidade de utilização													
			Métodos de inferência e defuzzyficação													
			Inferência max-min							Inferência max-produto						
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CS	CM	CA	BA	MM	LM	SM	CS	CM	
1	0,948429	0,368827	0,373	0,350	0,375	0,360	0,240	0,376	0,369	0,371	0,340	0,375	0,300	0,300	0,373	0,369
2	0,614522	0,235558	0,250	0,260	0,257	0,380	0,220	0,245	0,236	0,243	0,260	0,257	0,300	0,300	0,240	0,236
3	0,615526	0,241417	0,254	0,270	0,262	0,380	0,220	0,250	0,241	0,248	0,260	0,262	0,300	0,300	0,245	0,241
4	0,258804	0,265987	0,266	0,280	0,266	0,340	0,260	0,240	0,266	0,266	0,280	0,266	0,300	0,300	0,229	0,264
5	1,000000	1,000000	0,939	0,900	0,900	1,000	0,900	0,939	1,000	0,939	0,900	0,900	1,000	0,900	0,939	1,000

Tabela 4.11 – Resultados da inferência *max-min-produto* e *max-produto-min*, para 5 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída													
			Intensidade de utilização													
			Métodos de inferência e defuzzyficação													
			Inferência max-min-produto							Inferência max-produto-min						
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CS	CM	CA	BA	MM	LM	SM	CS	CM	
1	0,948429	0,368827	0,371	0,340	0,375	0,300	0,300	0,373	0,369	0,373	0,350	0,375	0,360	0,240	0,378	0,369
2	0,614522	0,235558	0,243	0,260	0,257	0,300	0,300	0,240	0,236	0,257	0,260	0,257	0,380	0,220	0,247	0,236
3	0,615526	0,241417	0,248	0,260	0,262	0,300	0,300	0,245	0,241	0,262	0,270	0,262	0,380	0,220	0,251	0,241
4	0,258804	0,265987	0,266	0,280	0,266	0,300	0,300	0,229	0,266	0,266	0,280	0,266	0,340	0,260	0,240	0,266
5	1,000000	1,000000	0,939	0,900	0,900	1,000	0,900	0,939	1,000	0,939	0,900	0,900	1,000	0,900	0,939	1,000

Tabela 4.12 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – aumentando a faixa dos valores da função de pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída										
			Intensidade de utilização										
			Métodos de inferência e defuzzyficação										
			Inferência max-min					Inferência max-produto					
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM		
1	0,948429	0,368827	0,387	0,370	0,300	0,360	0,240	0,374	0,360	0,300	0,300	0,300	
2	0,614522	0,235558	0,292	0,280	0,300	0,380	0,220	0,267	0,270	0,300	0,300	0,300	
3	0,615526	0,241417	0,298	0,290	0,300	0,380	0,220	0,272	0,280	0,300	0,300	0,300	
4	0,258804	0,265987	0,315	0,300	0,300	0,340	0,260	0,272	0,280	0,300	0,300	0,300	
5	1,000000	1,000000	0,863	0,880	0,950	1,000	0,900	0,863	0,880	0,950	1,000	0,900	

Tabela 4.13 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a simetria da função de pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída										
			Intensidade de utilização										
			Métodos de inferência e defuzzyficação										
			Inferência max-min					Inferência max-produto					
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM		
1	0,948429	0,368827	0,392	0,370	0,310	0,360	0,260	0,366	0,350	0,300	0,300	0,300	
2	0,614522	0,235558	0,262	0,260	0,320	0,410	0,230	0,247	0,260	0,300	0,300	0,300	
3	0,615526	0,241417	0,264	0,270	0,320	0,410	0,230	0,252	0,260	0,300	0,300	0,300	
4	0,258804	0,265987	0,274	0,290	0,310	0,360	0,260	0,265	0,280	0,300	0,300	0,300	
5	1,000000	1,000000	0,894	0,900	0,950	1,000	0,900	0,894	0,900	0,950	1,000	0,900	

Tabela 4.14 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (trap-gauss-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,367	0,340	0,300	0,360	0,240	0,353	0,330	0,300	0,300	0,300
2	0,614522	0,235558	0,256	0,270	0,300	0,380	0,220	0,251	0,270	0,300	0,300	0,300
3	0,615526	0,241417	0,261	0,270	0,300	0,380	0,220	0,257	0,280	0,300	0,300	0,300
4	0,258804	0,265987	0,281	0,290	0,300	0,340	0,260	0,273	0,290	0,300	0,300	0,300
5	1,000000	1,000000	0,893	0,900	0,950	1,000	0,900	0,894	0,900	0,950	1,000	0,900

Tabela 4.15 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,361	0,340	0,300	0,360	0,240	0,345	0,330	0,300	0,300	0,300
2	0,614522	0,235558	0,247	0,260	0,300	0,380	0,220	0,243	0,260	0,300	0,300	0,300
3	0,615526	0,241417	0,251	0,260	0,300	0,380	0,220	0,249	0,270	0,300	0,300	0,300
4	0,258804	0,265987	0,268	0,280	0,300	0,340	0,260	0,261	0,280	0,300	0,300	0,300
5	1,000000	1,000000	0,877	0,890	0,950	1,000	0,900	0,879	0,890	0,950	0,950	0,950

Tabela 4.16 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (trap-trap-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,367	0,340	0,300	0,360	0,240	0,356	0,330	0,300	0,320	0,280
2	0,614522	0,235558	0,246	0,260	0,300	0,380	0,220	0,243	0,270	0,300	0,320	0,280
3	0,615526	0,241417	0,250	0,260	0,300	0,380	0,220	0,250	0,270	0,300	0,320	0,280
4	0,258804	0,265987	0,269	0,280	0,300	0,340	0,260	0,267	0,280	0,300	0,320	0,280
5	1,000000	1,000000	0,894	0,900	0,950	1,000	0,900	0,894	0,900	0,950	1,000	0,900

Tabela 4.17 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (trap-sigm-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,601	0,600	0,685	1,000	0,370	0,601	0,600	1,000	1,000	1,000
2	0,614522	0,235558	0,555	0,560	0,620	1,000	0,240	0,564	0,570	1,000	1,000	1,000
3	0,615526	0,241417	0,561	0,570	0,625	1,000	0,250	0,569	0,580	1,000	1,000	1,000
4	0,258804	0,265987	0,576	0,580	0,630	1,000	0,260	0,581	0,590	1,000	1,000	1,000
5	1,000000	1,000000	0,601	0,600	0,950	1,000	0,900	0,601	0,600	1,000	1,000	1,000

Tabela 4.18 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação - (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,375	0,360	0,330	0,370	0,290	0,363	0,350	0,330	0,330	0,330
2	0,614522	0,235558	0,240	0,230	0,165	0,230	0,100	0,235	0,220	0,165	0,170	0,160
3	0,615526	0,241417	0,245	0,240	0,165	0,240	0,090	0,242	0,230	0,165	0,170	0,160
4	0,258804	0,265987	0,259	0,270	0,330	0,400	0,260	0,263	0,280	0,330	0,330	0,330
5	1,000000	1,000000	0,952	0,960	0,990	1,000	0,980	0,952	0,960	0,990	1,000	0,980

Tabela 4.19 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – aumentando a faixa dos valores da função de pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,373	0,360	0,330	0,360	0,300	0,366	0,350	0,330	0,330	0,330
2	0,614522	0,235558	0,256	0,240	0,180	0,230	0,130	0,244	0,230	0,170	0,170	0,170
3	0,615526	0,241417	0,259	0,250	0,180	0,240	0,120	0,250	0,230	0,170	0,170	0,170
4	0,258804	0,265987	0,268	0,270	0,180	0,250	0,110	0,265	0,270	0,170	0,170	0,170
5	1,000000	1,000000	0,919	0,930	0,990	1,000	0,980	0,919	0,930	0,990	1,000	0,980

Tabela 4.20 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto* com 7 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a simetria da função de pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,382	0,360	0,305	0,360	0,250	0,365	0,340	0,280	0,280	0,280
2	0,614522	0,235558	0,258	0,260	0,310	0,380	0,240	0,253	0,260	0,280	0,280	0,280
3	0,615526	0,241417	0,261	0,260	0,310	0,370	0,250	0,259	0,270	0,280	0,280	0,280
4	0,258804	0,265987	0,268	0,280	0,290	0,320	0,260	0,275	0,280	0,280	0,280	0,280
5	1,000000	1,000000	0,952	0,960	0,990	1,000	0,980	0,952	0,960	0,990	1,000	0,980

Tabela 4.21 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (trap-gauss-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,361	0,350	0,330	0,380	0,280	0,347	0,340	0,330	0,330	0,330
2	0,614522	0,235558	0,240	0,230	0,165	0,230	0,100	0,233	0,210	0,165	0,170	0,160
3	0,615526	0,241417	0,246	0,240	0,165	0,240	0,090	0,242	0,230	0,165	0,170	0,160
4	0,258804	0,265987	0,265	0,280	0,330	0,400	0,260	0,270	0,290	0,330	0,330	0,330
5	1,000000	1,000000	0,925	0,950	0,990	1,000	0,980	0,940	0,950	0,990	1,000	0,980

Tabela 4.22 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,360	0,340	0,330	0,370	0,290	0,347	0,340	0,330	0,330	0,330
2	0,614522	0,235558	0,240	0,230	0,165	0,230	0,100	0,233	0,210	0,165	0,170	0,160
3	0,615526	0,241417	0,246	0,240	0,165	0,240	0,240	0,242	0,230	0,165	0,170	0,160
4	0,258804	0,265987	0,265	0,280	0,330	0,400	0,400	0,270	0,290	0,330	0,330	0,330
5	1,000000	1,000000	0,925	0,950	0,980	1,000	0,960	0,940	0,950	0,980	0,980	0,980

Tabela 4.23 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (trap-trap-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,364	0,350	0,335	0,380	0,290	0,354	0,340	0,330	0,340	0,320
2	0,614522	0,235558	0,237	0,220	0,165	0,230	0,100	0,232	0,210	0,165	0,180	0,150
3	0,615526	0,241417	0,243	0,240	0,165	0,240	0,090	0,240	0,230	0,165	0,180	0,150
4	0,258804	0,265987	0,261	0,270	0,330	0,400	0,260	0,265	0,280	0,330	0,340	0,320
5	1,000000	1,000000	0,952	0,960	0,990	1,000	0,980	0,952	0,960	0,990	1,000	0,980

Tabela 4.24 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (trap-sigm-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,543	0,540	0,685	1,000	0,370	0,543	0,540	1,000	1,000	1,000
2	0,614522	0,235558	0,543	0,540	0,620	1,000	0,240	0,543	0,540	1,000	1,000	1,000
3	0,615526	0,241417	0,543	0,540	0,625	1,000	0,250	0,543	0,540	1,000	1,000	1,000
4	0,258804	0,265987	0,543	0,540	0,630	1,000	0,260	0,543	0,540	1,000	1,000	1,000
5	1,000000	1,000000	0,543	0,540	0,750	1,000	0,980	0,543	0,540	0,990	1,000	0,980

Tabela 4.25 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 9 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,365	0,370	0,375	0,420	0,330	0,371	0,370	0,375	0,380	0,370
2	0,614522	0,235558	0,231	0,240	0,250	0,260	0,240	0,239	0,250	0,250	0,250	0,250
3	0,615526	0,241417	0,238	0,250	0,250	0,250	0,250	0,244	0,250	0,250	0,250	0,250
4	0,258804	0,265987	0,262	0,260	0,250	0,260	0,240	0,251	0,250	0,250	0,250	0,250
5	1,000000	1,000000	0,964	0,970	0,995	1,000	0,990	0,964	0,970	0,995	1,000	0,990

Tabela 4.26 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 9 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – aumentando a faixa dos valores da função de pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,385	0,380	0,360	0,400	0,320	0,376	0,370	0,360	0,360	0,360
2	0,614522	0,235558	0,254	0,240	0,235	0,240	0,230	0,244	0,240	0,230	0,230	0,230
3	0,615526	0,241417	0,263	0,250	0,235	0,240	0,230	0,250	0,240	0,230	0,230	0,230
4	0,258804	0,265987	0,280	0,260	0,230	0,260	0,200	0,249	0,240	0,230	0,230	0,230
5	1,000000	1,000000	0,938	0,950	0,995	1,000	0,990	0,947	0,960	0,995	1,000	0,990

Tabela 4.27 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, com 9 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a simetria da função de pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,349	0,350	0,325	0,360	0,290	0,347	0,340	0,310	0,310	0,310
2	0,614522	0,235558	0,219	0,220	0,215	0,260	0,170	0,221	0,220	0,200	0,200	0,200
3	0,615526	0,241417	0,225	0,230	0,215	0,260	0,170	0,225	0,220	0,200	0,200	0,200
4	0,258804	0,265987	0,265	0,250	0,215	0,260	0,170	0,239	0,230	0,200	0,200	0,200
5	1,000000	1,000000	0,953	0,950	0,960	1,000	0,920	0,953	0,950	0,960	1,000	0,920

Tabela 4.28 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 9 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (trap-gauss-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,369	0,370	0,375	0,420	0,330	0,372	0,370	0,375	0,380	0,370
2	0,614522	0,235558	0,239	0,250	0,250	0,260	0,240	0,243	0,250	0,250	0,250	0,250
3	0,615526	0,241417	0,244	0,250	0,250	0,250	0,250	0,246	0,250	0,250	0,250	0,250
4	0,258804	0,265987	0,260	0,250	0,250	0,260	0,240	0,248	0,250	0,250	0,250	0,250
5	1,000000	1,000000	0,945	0,960	0,995	1,000	0,990	0,956	0,970	0,995	1,000	0,990

Tabela 4.29 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 9 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,369	0,370	0,375	0,420	0,330	0,372	0,370	0,375	0,380	0,370
2	0,614522	0,235558	0,239	0,250	0,250	0,260	0,240	0,243	0,250	0,250	0,250	0,250
3	0,615526	0,241417	0,244	0,250	0,250	0,250	0,250	0,246	0,250	0,250	0,250	0,250
4	0,258804	0,265987	0,260	0,250	0,250	0,260	0,260	0,248	0,250	0,250	0,250	0,250
5	1,000000	1,000000	0,945	0,960	0,990	1,000	0,980	0,957	0,970	0,990	0,990	0,990

Tabela 4.30 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 9 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (trap-trap-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,375	0,370	0,375	0,420	0,330	0,375	0,370	0,375	0,380	0,370
2	0,614522	0,235558	0,247	0,250	0,250	0,260	0,240	0,248	0,250	0,250	0,260	0,240
3	0,615526	0,241417	0,250	0,250	0,250	0,260	0,240	0,250	0,250	0,250	0,260	0,240
4	0,258804	0,265987	0,250	0,250	0,250	0,260	0,240	0,250	0,250	0,250	0,260	0,240
5	1,000000	1,000000	0,964	0,970	0,995	1,000	0,990	0,964	0,970	0,995	1,000	0,990

Tabela 4.31 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto* com 9 valores fuzzy e diversos métodos de defuzzyficação – variando a função de pertinência (trap-sigm-trap).

(j)	Entradas		Saída									
			Intensidade de utilização									
			Métodos de inferência e defuzzyficação									
			Inferência Max-min					Inferência max-produto				
E.C.	M. A.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	0,534	0,530	0,685	1,000	0,370	0,534	0,530	0,950	1,000	0,900
2	0,614522	0,235558	0,533	0,530	0,620	1,000	0,240	0,534	0,530	0,950	1,000	0,900
3	0,615526	0,241417	0,533	0,533	0,625	1,000	0,250	0,534	0,530	0,950	1,000	0,900
4	0,258804	0,265987	0,534	0,530	0,630	1,000	0,260	0,534	0,530	0,950	1,000	0,900
5	1,000000	1,000000	0,534	0,530	0,750	1,000	0,900	0,534	0,530	0,950	1,000	0,900

a) Resultados defuzzyficionados para as regras do tipo II:

Tabela 4.32 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação (trap-tri-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,427	0,440	0,500	0,680	0,320	0,415	0,440	0,500	0,500	0,500
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,368	0,330	0,155	0,310	0,000	0,284	0,230	0,075	0,150	0,000
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,342	0,280	0,125	0,250	0,000	0,290	0,230	0,075	0,150	0,000
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,195	0,190	0,130	0,260	0,000	0,175	0,160	0,075	0,150	0,000
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,803	0,810	0,865	1,000	0,730	0,825	0,840	0,925	1,000	0,850

Tabela 4.33 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy para (EC, MA e IP), e diversos métodos de defuzzyficação – aumentando a faixa dos valores da função de pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas			Saída										
				Intensidade de utilização										
				Métodos de inferência e defuzzyficação										
				Inferência max-min					Inferência max-produto					
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM		
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,442	0,440	0,500	0,680	0,320	0,427	0,440	0,500	0,500	0,500	
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,388	0,340	0,125	0,250	0,000	0,335	0,280	0,075	0,150	0,000	
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,390	0,340	0,125	0,250	0,000	0,339	0,290	0,075	0,150	0,000	
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,226	0,220	0,130	0,260	0,000	0,208	0,190	0,075	0,150	0,000	
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,773	0,780	0,860	1,000	0,720	0,793	0,810	0,925	1,000	0,850	

Tabela 4.34 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação – variando a simetria da pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas			Saída										
				Intensidade de utilização										
				Métodos de inferência e defuzzyficação										
				Inferência max-min					Inferência max-produto					
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM		
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,476	0,450	0,325	0,360	0,290	0,479	0,450	0,300	0,300	0,300	
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,407	0,400	0,390	0,550	0,230	0,377	0,360	0,300	0,300	0,300	
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,411	0,400	0,390	0,550	0,230	0,385	0,370	0,300	0,300	0,300	
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,243	0,170	0,095	0,190	0,000	0,136	0,120	0,075	0,150	0,000	
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,689	0,730	0,905	1,000	0,810	0,711	0,750	0,925	1,000	0,850	

Tabela 4.35 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - variando a função de pertinência (trap-gauss-trap).

(j)	Entradas			Saída										
				Intensidade de utilização										
				Métodos de inferência e defuzzyficação										
				Inferência max-min					Inferência max-produto					
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM		
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,436	0,450	0,500	0,680	0,320	0,432	0,460	0,500	0,500	0,500	
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,321	0,250	0,120	0,240	0,000	0,271	0,210	0,095	0,180	0,010	
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,325	0,260	0,120	0,240	0,000	0,277	0,220	0,095	0,180	0,010	
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,200	0,190	0,130	0,260	0,000	0,171	0,160	0,095	0,180	0,010	
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,814	0,830	0,880	1,000	0,760	0,839	0,850	0,905	0,980	0,830	

Tabela 4.36 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - variando a função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

(j)	Entradas			Saída										
				Intensidade de utilização										
				Métodos de inferência e defuzzyficação										
				Inferência max-min					Inferência max-produto					
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM		
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,430	0,440	0,500	0,680	0,320	0,430	0,450	0,500	0,500	0,500	
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,325	0,260	0,115	0,230	0,000	0,280	0,220	0,090	0,090	0,090	
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,331	0,270	0,120	0,240	0,000	0,286	0,230	0,090	0,090	0,090	
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,221	0,200	0,130	0,260	0,000	0,194	0,170	0,090	0,090	0,090	
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,783	0,810	0,880	1,000	0,760	0,816	0,840	0,910	0,910	0,910	

Tabela 4.37 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - variando a função de pertinência (trap-trap-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,415	0,430	0,500	0,680	0,320	0,422	0,450	0,500	0,570	0,430
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,278	0,230	0,115	0,230	0,000	0,248	0,200	0,095	0,180	0,010
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,287	0,230	0,120	0,240	0,000	0,256	0,210	0,095	0,180	0,010
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,185	0,180	0,130	0,260	0,000	0,170	0,160	0,095	0,180	0,010
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,832	0,840	0,880	1,000	0,760	0,845	0,850	0,905	0,980	0,830

Tabela 4.38 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 3 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - variando a função de pertinência (trap-sigm-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,544	0,560	0,660	1,000	0,320	0,583	0,610	1,000	1,000	1,000
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,352	0,260	0,115	0,230	0,000	0,354	0,250	0,095	0,180	0,010
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,364	0,270	0,120	0,240	0,000	0,368	0,260	0,095	0,180	0,010
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,405	0,320	0,130	0,260	0,000	0,320	0,220	0,095	0,180	0,010
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,627	0,630	0,680	1,000	0,360	0,646	0,650	1,000	1,000	1,000

Tabela 4.39 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação (trap-tri-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,370	0,360	0,250	0,360	0,140	0,368	0,360	0,250	0,250	0,250
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,249	0,250	0,250	0,360	0,140	0,249	0,250	0,250	0,250	0,250
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,249	0,250	0,250	0,360	0,140	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,100	0,080	0,030	0,060	0,000	0,084	0,070	0,025	0,050	0,00
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,907	0,910	0,950	1,000	0,900	0,916	0,930	0,975	1,000	0,950

Tabela 4.40 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - aumentando a faixa dos valores da função de pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,387	0,370	0,300	0,360	0,240	0,374	0,360	0,300	0,300	0,300
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,292	0,280	0,300	0,380	0,220	0,267	0,270	0,300	0,300	0,300
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,296	0,290	0,300	0,380	0,220	0,272	0,280	0,300	0,300	0,300
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,189	0,160	0,070	0,140	0,00	0,142	0,130	0,050	0,100	0,000
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,854	0,860	0,925	1,000	0,850	0,863	0,880	0,950	1,000	0,900

Tabela 4.41 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy para (EC, MA e IP), diversos métodos de defuzzyficação–variando a simetria da função de pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,378	0,390	0,470	0,570	0,370	0,380	0,400	0,450	0,450	0,450
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,237	0,230	0,220	0,320	0,120	0,232	0,230	0,200	0,200	0,200
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,237	0,240	0,220	0,320	0,120	0,233	0,230	0,200	0,200	0,200
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,110	0,090	0,045	0,090	0,000	0,084	0,070	0,025	0,050	0,00
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,904	0,910	0,935	1,000	0,870	0,917	0,930	0,975	1,000	0,950

Tabela 4.42 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - variando a função de pertinência (trap-gauss-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,371	0,360	0,250	0,360	0,140	0,367	0,350	0,250	0,250	0,250
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,276	0,260	0,250	0,360	0,140	0,257	0,250	0,250	0,250	0,250
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,279	0,260	0,250	0,360	0,140	0,258	0,250	0,250	0,250	0,250
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,119	0,090	0,040	0,080	0,000	0,080	0,070	0,035	0,070	0,000
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,883	0,920	0,955	1,000	0,910	0,915	0,930	0,965	1,000	0,930

Tabela 4.43 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - variando a função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,371	0,360	0,250	0,360	0,140	0,367	0,350	0,250	0,250	0,250
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,274	0,260	0,250	0,360	0,140	0,256	0,250	0,250	0,250	0,250
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,278	0,260	0,250	0,360	0,140	0,258	0,250	0,250	0,250	0,250
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,126	0,090	0,040	0,080	0,000	0,090	0,080	0,035	0,040	0,030
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,882	0,920	0,960	1,000	0,920	0,910	0,930	0,965	0,970	0,960

Tabela 4.44 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - variando a função de pertinência (trap-trap-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,366	0,360	0,250	0,360	0,140	0,364	0,350	0,250	0,290	0,210
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,250	0,250	0,250	0,360	0,140	0,250	0,250	0,250	0,290	0,210
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,250	0,250	0,250	0,360	0,140	0,250	0,250	0,250	0,290	0,210
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,079	0,070	0,040	0,080	0,000	0,078	0,070	0,035	0,070	0,000
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,933	0,940	0,960	1,000	0,920	0,936	0,940	0,965	1,000	0,930

Tabela 4.45 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 5 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - variando a função de pertinência (trap-sigm-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,562	0,560	0,635	1,000	0,270	0,563	0,570	1,000	1,000	1,000
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,561	0,560	0,620	1,000	0,240	0,563	0,570	1,000	1,000	1,000
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,561	0,560	0,625	1,000	0,250	0,563	0,570	1,000	1,000	1,000
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,509	0,510	0,567	1,000	0,000	0,511	0,520	1,000	1,000	1,000
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,563	0,560	0,660	1,000	0,320	0,563	0,570	0,965	1,000	0,930

Tabela 4.46 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação (trap-tri-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,375	0,360	0,330	0,370	0,290	0,363	0,350	0,330	0,330	0,330
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,240	0,230	0,165	0,230	0,100	0,235	0,220	0,165	0,170	0,160
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,245	0,240	0,165	0,240	0,090	0,242	0,230	0,165	0,170	0,070
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,136	0,130	0,035	0,070	0,000	0,123	0,120	0,005	0,010	0,000
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,950	0,960	0,985	1,000	0,970	0,952	0,960	0,990	1,000	0,980

Tabela 4.47 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - aumentando a faixa dos valores da função de pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,373	0,370	0,350	0,370	0,330	0,369	0,360	0,350	0,350	0,350
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,256	0,240	0,200	0,230	0,170	0,242	0,230	0,200	0,200	0,200
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,259	0,240	0,200	0,240	0,160	0,247	0,230	0,200	0,200	0,200
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,090	0,080	0,045	0,090	0,000	0,081	0,070	0,010	0,020	0,000
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,917	0,930	0,980	1,000	0,960	0,919	0,930	0,990	1,000	0,980

Tabela 4.48 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy para (EC, MA e IP), diversos métodos de defuzzyficação-variando a simetria da função de pertinência (trap-tri-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
E.C	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,379	0,360	0,310	0,360	0,260	0,365	0,340	0,300	0,300	0,300
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,379	0,360	0,310	0,360	0,260	0,365	0,340	0,300	0,300	0,300
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,249	0,260	0,315	0,380	0,250	0,249	0,260	0,300	0,300	0,300
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,124	0,100	0,035	0,070	0,000	0,104	0,080	0,015	0,030	0,000
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,940	0,940	0,955	1,000	0,910	0,947	0,950	0,970	1,000	0,940

Tabela 4.49 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - variando a função de pertinência (trap-gauss-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
EC	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,365	0,350	0,330	0,360	0,300	0,352	0,340	0,330	0,330	0,330
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,240	0,230	0,165	0,230	0,100	0,233	0,210	0,165	0,170	0,160
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,246	0,240	0,165	0,240	0,090	0,242	0,230	0,165	0,170	0,160
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,135	0,130	0,035	0,070	0,000	0,119	0,110	0,015	0,030	0,000
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,926	0,950	0,980	1,000	0,960	0,943	0,960	0,980	1,000	0,960

Tabela 4.50 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - variando a função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
EC	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,365	0,350	0,330	0,370	0,290	0,352	0,340	0,330	0,330	0,330
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,240	0,230	0,165	0,230	0,100	0,233	0,210	0,165	0,170	0,160
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,246	0,240	0,165	0,240	0,090	0,242	0,230	0,165	0,170	0,160
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,134	0,120	0,035	0,070	0,000	0,119	0,120	0,010	0,010	0,010
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,925	0,950	0,985	1,000	0,970	0,941	0,960	0,980	0,980	0,980

Tabela 4.51 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - variando a função de pertinência (trap-trap-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
EC	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,341	0,330	0,330	0,370	0,290	0,337	0,330	0,330	0,360	0,300
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,234	0,220	0,165	0,230	0,100	0,230	0,210	0,165	0,190	0,140
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,242	0,230	0,165	0,240	0,090	0,240	0,230	0,165	0,190	0,140
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,121	0,110	0,035	0,070	0,000	0,111	0,100	0,020	0,040	0,000
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,956	0,960	0,980	1,000	0,960	0,956	0,960	0,980	1,000	0,960

Tabela 4.52 – Resultados da inferência *max-min* e *max-produto*, para 7 valores fuzzy para (EC, MA e IP) e diversos métodos de defuzzyficação - variando a função de pertinência (trap-sigm-trap).

(j)	Entradas			Saída									
				Intensidade de utilização									
				Métodos de inferência e defuzzyficação									
				Inferência max-min					Inferência max-produto				
EC	M.A.	I.P.	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	
1	0,948429	0,368827	-0,374745	0,543	0,540	0,655	1,000	0,310	0,543	0,540	0,880	1,000	0,760
2	0,614522	0,235558	0,000000	0,543	0,540	0,620	1,000	0,240	0,543	0,540	0,880	1,000	1,000
3	0,615526	0,241417	0,000000	0,543	0,540	0,625	1,000	0,250	0,543	0,540	0,880	1,000	0,760
4	0,258804	0,265987	1,000000	0,509	0,510	0,592	1,000	0,000	0,509	0,510	0,737	1,000	0,000
5	1,000000	1,000000	-0,291237	0,543	0,540	0,680	1,000	0,360	0,543	0,540	0,880	1,000	0,760

A análise de valor de todos os resultados apresentados nas *Tabelas 4.3-4.52* é objeto de estudo do capítulo 5.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DA QUALIDADE DOS MODELOS FUZZY

5.1. Qualidade do modelo fuzzy

Do ponto de vista de intuição, uma avaliação da qualidade dos modelos fuzzy está associada com estimação em até que ponto se pode expandir ou variar as condições em análise (valores fuzzy, variáveis lingüísticas, sobreposições, número de regras na base de conhecimento, etc) para que não ocorra degradação na qualidade do modelo em estudo e conseqüentemente dificuldades do ponto de vista de confiabilidade nos valores obtidos como resposta. No trabalho [46], como mais importantes indicadores para a avaliação da qualidade dos modelos fuzzy são considerados:

- adequação do modelo fuzzy,
- complexidade do modelo fuzzy.

Com relação à adequação dos modelos fuzzy, é possível usar critérios especiais, por exemplo, [46],[48], que refletem os desvios entre os resultados de defuzzyficação e os valores considerados como “padrões” (saídas desejáveis).

O ajuste dos modelos fuzzy, primeiramente, está associado [29],[62], com a definição e correção do número dos valores fuzzy das variáveis lingüísticas e, além disso, com definição das características específicas das funções de pertinência (tipo, formas, sobreposição, etc.) desses valores. Desse ajuste, considerando-se a essência do problema de controle de tensão e potência reativa, não pode ser baseada na utilização de métodos tradicionais [51]. Para superar esta situação, é possível utilizar a forte relação [24] entre as regras, incluídas na base de conhecimento, e os modelos de tomada de decisões multicritério.

As questões da estimação da complexidade dos modelos fuzzy são discutidas nos trabalhos [46],[84]. Particularmente, no trabalho [46] a complexidade estimada pelo número p de regras da base de conhecimento, é levada em consideração. No trabalho [84] foi justificada a racionalidade da avaliação da complexidade do modelo fuzzy com base na seguinte correlação: $c = \ln p$.

Desta maneira temos para regras do tipo I: 3, 5, 7 e 9 valores fuzzy para as duas variáveis de entrada, portanto temos 9, 25, 49 e 81 regras. Calculando o valor de c para estes casos, temos: 2,20; 3,22; 3,89; 4,39 respectivamente. Para regras do tipo II temos: 3, 5 e 7 valores fuzzy para as três variáveis de entrada, portanto temos 27, 125 e 343 regras. Conseqüentemente para c temos: 3,30; 4,82; 5,84. Desta maneira, podemos ordenar os níveis de complexidade de acordo com o número de regras, independente do tipo de regras utilizadas: 2,20; 3,22; 3,30; 3,89; 4,39; 4,82; 5,84 para 9, 25, 27, 49, 81, 125 e 343 regras.

Desses resultados obtidos, podemos avaliar que o nível de complexidade aumenta com o aumento do número de regras, que é refletido também pelo aumento no número de valores fuzzy e número de variáveis lingüísticas de entrada.

5.2. Tomada de decisões multicritério em ambiente fuzzy e sua aplicação na avaliação da adequação dos modelos fuzzy

Na realidade, os resultados de defuzzyficação para todos os dispositivos de compensação e regulação podem servir como base para a ordenação de racionalidade ou intensidade da utilização desses dispositivos. Levando isso em consideração, é possível construir o seguinte caminho associado com a avaliação da adequação dos modelos fuzzy construídos.

Aplicando os resultados dos trabalhos [85],[86], baseados na abordagem de Bellman-Zadeh para tomada de decisões em ambiente fuzzy [87], é possível construir algumas soluções dos problemas de tomada de decisões multicritério que podem servir como "padrões" para a avaliação da adequação dos modelos fuzzy, baseados na utilização dos diferentes procedimentos da lógica fuzzy ou suas diferentes combinações.

Seguindo aos resultados [85-91] todo indicador $F_p(X)$, $p = 1, \dots, q$ (que corresponde, por exemplo, a "eficiência de controle", "margem adequada", etc.) deve ser substituído por um conjunto fuzzy

$$A_p = \{X, \mu_{A_p}(X)\}, \quad X \in L, \quad p = 1, \dots, q, \quad (5.1)$$

Onde:

$\mu_{A_p}(X)$ e uma função de pertinência de A_p .

A solução fuzzy D , com base nos conjuntos fuzzy A_p , que devem refletir a qualidade dos correspondentes indicadores, é formado como $D = \bigcap_{p=1}^q A_p$ com a função de pertinência

$$\mu_D(X) = \min_{p=1, \dots, q} \mu_{A_p}(X), \quad X \in L. \quad (5.2)$$

Sua utilização permite obter uma solução que prove o grau máximo

$$\max \mu_D(X) = \max_{X \in L} \min_{p=1, \dots, q} \mu_{A_p}(X). \quad (5.3)$$

de pertinência à solução fuzzy D . De tal forma, do ponto de vista formal, o problema da escolha da alternativa multicritério é substituído pelo o seguinte problema:

$$X^0 = \arg \max_{X \in L} \min_{p=1, \dots, q} \mu_{A_p}(X). \quad (5.4)$$

É natural, que essa abordagem possa servir não somente para a escolha de uma alternativa melhor, mas também para a ordenação das alternativas $X \in L$. A racionalidade de utilização da abordagem descrita está associada com as seguintes considerações.

A falta de clareza na concepção da "solução ótima" é a dificuldade metodológica fundamental na solução de problemas multicritério. Quando é aplicada a abordagem descrita, esta concepção é definida com razoável validade: o máximo "grau de implementação de todos os objetivos (requerimentos dos índices)" serve como um critério de otimalidade, que concorda com o princípio da garantia do resultado e produz uma linha para se obter soluções harmoniosas. De acordo com [88],[91], uma solução chama-se harmoniosa se níveis de satisfação de todos os objetivos são iguais ou próximos se não distinguimos a importância desses objetivos.

Para a obtenção de (5.4), é necessário construir funções de pertinência $\mu_{A_p}(X)$, $p = 1, \dots, q$ que devem refletir a qualidade dos correspondentes índices. Essa condição é satisfeita pela utilização de funções de pertinência

$$\mu_{A_p}(X) = \left[\frac{F_p(X) - \min_{X \in L} F_p(X)}{\max_{X \in L} F_p(X) - \min_{X \in L} F_p(X)} \right]^{\lambda_p}, \quad (5.5)$$

para índices que demandam sua maximização ou pela utilização de funções de pertinência

$$\mu_{A_p}(X) = \left[\frac{\max_{X \in L} F_p(X) - F_p(X)}{\max_{X \in L} F_p(X) - \min_{X \in L} F_p(X)} \right]^{\lambda_p}. \quad (5.6)$$

para índices que demandam sua minimização. Em (5.5) e (5.6), $\lambda_p, p = 1, \dots, q$ são fatores de importância dos correspondentes índices.

5.2.1. Obtenção dos valores padrões

Baseando-se nos módulos dos valores dos coeficientes de sensibilidades de tensão (*Tabela 2.10*) e nos valores obtidos para a variável lingüística *margem adequada* (*Tabela 2.12*), podemos utilizar a correlação (5.5) para construir as funções de pertinência para a variável lingüística *eficiência de controle* e *margem adequada*, respectivamente. Utilizando-se os resultados obtidos, é possível calcular os valores para a variável lingüística de saída, *intensidade de utilização*. Para este cálculo devemos basear na correlação (5.4), onde devemos considerar os valores *mínimos* entre os valores encontrados para as variáveis lingüísticas, *eficiência de controle* e *margem adequada*, para cada dispositivo de compensação e regulação j . Esses valores podem ser considerados valores “padrões”, os quais servirão de parâmetros de cálculos de desvios entre os diversos resultados de defuzzyficação obtidos nos experimentos realizados para regras do tipo I. Os “padrões” obtidos para os dispositivos em análise, são calculados abaixo e seus resultados contemplados na *Tabela 5.1*.

Tabela 5.1 – Resultados obtidos utilizando a técnica de tomada de decisão multicritério em ambiente fuzzy, para regras do tipo I.

Dispositivos (j)	Resultados
x_1	0,36883
x_2	0,23556
x_3	0,24142
x_4	0,25880
x_5	1,00000

Para o caso das regras do tipo II, devemos considerar também os valores dos coeficientes de sensibilidades para perdas (Tabela 2.14) que correspondem à variável lingüística *incremento de perdas*. É importante levar em consideração de maneira mais profunda às situações em que os coeficientes de sensibilidade para perdas indicam a não utilização de um determinado dispositivo de regulação de tensão ou de compensação de potencia reativa, enquanto que os coeficientes de sensibilidade de tensão indicam a utilização do mesmo dispositivo para as ações de controle. Portanto, para evitar ignorar dispositivos nessa situação, podemos corrigir o intervalo inicial (por exemplo -13,265306) e final (35,398230) da variável lingüística *incremento de perdas* em $\pm 10\%$ por exemplo.

Considerando a correlação (5.6) podemos construir as funções de pertinência para esse caso. Com os valores obtidos desta forma e com base em (5.2), encontramos o *mínimo* entre os três indicadores (*eficiência de controle, margem adequada e incremento de perdas*). Esses resultados encontrados são considerados valores “padrões” para regras do tipo II e são contemplados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados obtidos utilizando a técnica de tomada de decisão multicritério em ambiente fuzzy, para regras do tipo II.

Dispositivos (j)	Resultados
x_1	0,36883
x_2	0,23556
x_3	0,24142
x_4	0,09247
x_5	0,94334

De posse dos valores “padrões” para regras do tipo I e II, é possível avaliar os desvios entre os valores obtidos na defuzzyficação e os valores “padrões” encontrados, para cada experimento realizado.

5.3. Estimativas de desvios entre a solução “padrão” e os resultados de defuzzyficação encontrados

Para avaliarmos o modelo fuzzy do ponto de vista de adequação, efetuaremos os cálculos de desvios entre os resultados considerados “padrões” (Tabelas 5.1 e 5.2), e os resultados da defuzzyficação obtidos com os procedimentos da lógica fuzzy.

Para esses cálculos é possível utilizar as diversas medidas (por exemplo, distâncias de Minkowski [26],[45],[52], de Hamming [26], de Tchebyshev [26]). Entretanto, levando em consideração as recomendações do trabalho [52], nós utilizamos a distância Euclidiana que, na realidade, é um caso particular da distância de Minkowski [26],[45]. Usando a distância Euclidiana, é possível avaliar os procedimentos de lógica fuzzy que apresentaram melhores resultados do ponto de vista de adequação do modelo fuzzy. Quanto maior for a similaridade entre os conjuntos (números), menor será a distância encontrada entre eles. A correlação de distância Euclidiana é a seguinte:

$$d(A, B) = \sqrt[p]{\int_x |A(x) - B(x)|^p dx} \quad , \quad p = 2: \quad (5.7)$$

para o universo de discurso contínuo ou

$$d(A, B) = \sum (|A(x) - B(x)|^p)^{1/p} \quad , \quad p = 2. \quad (5.8)$$

para o universo de discurso discreto.

Estas características podem refletir os desvios para todos os dispositivos de controle de tensão ou compensação de potência reativa envolvidos em experimentos computacionais. Levando isso em consideração, para caracterizar integralmente qualquer combinação dos procedimentos de lógica fuzzy, nós usamos o valor médio $d^m(A, B)$ dos desvios para todos os dispositivos.

5.3.1. Cálculo dos desvios entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados.

Como indicado anteriormente, estes cálculos serão efetuados com base nas medidas de “distância Euclidiana” (5.8). Para exemplificar esse cálculo, utilizaremos os resultados encontrados para o caso em que temos cinco valores fuzzy para todas as variáveis lingüísticas, funções de pertinência trapezoidais para os valores iniciais e finais e triangulares para valores intermediários, considerando as regras do tipo I e esquema *max-min* de Mamdani (Tabela 4.10).

Esses cálculos são baseados nos resultados da Tabela 5.1 (padrão) e nos resultados de defuzzyficação encontrados na Tabela 4.10.

Considerando o resultado baseado no método de defuzzyficação CA e a correlação (5.8):

- Para o dispositivo de controle: x_1

$$d(A, B) = \sum (|0,36883 - 0,373|)^2)^{1/2} = 0,004;$$

- Para o dispositivo de controle: x_2

$$d(A, B) = \sum (|0,23556 - 0,250|)^2)^{1/2} = 0,014;$$

- Para o dispositivo de controle: x_3

$$d(A, B) = \sum (|0,24142 - 0,254|)^2)^{1/2} = 0,013;$$

- Para o dispositivo de controle: x_4

$$d(A, B) = \sum (|0,25880 - 0,266|)^2)^{1/2} = 0,007;$$

- Para o dispositivo de controle: x_5

$$d(A, B) = \sum (|1,0 - 0,939|)^2)^{1/2} = 0,061.$$

De tal forma, $d^m(A, B) = 0,020$.

Será necessário efetuar os cálculos das “distâncias Euclidianas” entre os valores “padrões” ((*Tabela 5.1*) para regras do tipo I e (*Tabela 5.2*) para regras do tipo II), e os resultados de defuzzyficação obtidos em todos os experimentos realizados. Dos resultados de desvios obtidos para todos os dispositivos, serão calculados os valores médios dos desvios ($d^m(A,B)$) para cada esquema de defuzzyficação. O desvio médio é o indicador de adequação e em conjunto com o indicador de complexidade, utilizaremos a abordagem tomada de decisão multicritério em ambiente fuzzy para fazer a distinção do procedimento de lógica fuzzy de melhor qualidade entre os diversos procedimentos adotados, considerado sob o ponto de vista de adequação e complexidade. Para atingir este objetivo, será necessário calcular os valores de pertinência ($\mu_{A_p}(d^m(A,B))$) para cada desvio médio, e os valores de pertinência ($\mu_{A_p}(c)$) dos níveis de complexidade (c), utilizando para isso a correlação (5.6).

5.4. Descrição dos cálculos de distâncias realizados

A seguir serão feitas breves descrições de todos os cálculos de desvios realizados e armazenados em tabelas, de acordo com cada procedimento de lógica fuzzy utilizado, considerando as variações no tipo de regras (I e II), número de valores fuzzy e funções de pertinência.

c) Regras do Tipo I:

- 3 valores fuzzy para cada variável lingüística: inicialmente utilizamos funções de pertinência trap-tri-trap, inferência *max-min* e *max-produto*. Estes resultados foram obtidos através do cálculo da “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.3*. Seus resultados constam da *Tabela 5.3*. Na *Tabela 5.4* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.4*, mantendo as mesmas condições iniciais e aumentando a faixa dos valores da função de pertinência. Na *Tabela 5.5* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.5*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a simetria das funções de

pertinência. Na *Tabela 5.6*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.6*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência dos valores intermediários para gaussiana. Na *Tabela 5.7*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.7*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência de todos os valores, para gaussiana. Na *Tabela 5.8*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados nas *Tabelas 4.8*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência de todos os valores, para trapezoidais.

- 5 valores fuzzy para cada variável lingüística: inicialmente utilizamos funções de pertinência trap-tri-trap e inferência *max-min*, *max-produto*, *max-min-produto* e *max-produto-min*. Estes resultados foram obtidos através do cálculo da “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.10* e *4.11*. Seus resultados constam da *Tabela 5.9* e *5.10*. Na *Tabela 5.11* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.12*, mantendo as mesmas condições iniciais, porem utilizando inferência *max-min* e *max-produto*, e aumentando a faixa dos valores da função de pertinência. Na *Tabela 5.12* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabelas 4.13*, mantendo as mesmas condições iniciais, porem utilizando inferência *max-min* e *max-produto* e variando a simetria das funções de pertinência. Na *Tabela 5.13*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.14*, mantendo as mesmas condições iniciais, porem utilizando inferência *max-min* e *max-produto* e variando a função de pertinência dos valores intermediários para gaussiana. Na *Tabela 5.14*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.15* mantendo as mesmas condições iniciais, porem utilizando inferência *max-min* e *max-produto*, e variando a função de pertinência de todos os valores, para gaussiana. Na *Tabela 5.15*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação

encontrados na *Tabela 4.16*, mantendo as mesmas condições iniciais, porém utilizando inferência *max-min* e *max-produto*, e variando a função de pertinência de todos os valores, para trapezoidais.

- 7 valores fuzzy para cada variável lingüística: inicialmente utilizamos funções de pertinência trap-tri-trap, inferência *max-min* e *max-produto*. Estes resultados foram obtidos através do cálculo da “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabelas 4.18*. Seus resultados constam da *Tabela 5.16*. Na *Tabela 5.17* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.19*, mantendo as mesmas condições iniciais e aumentando a faixa dos valores da função de pertinência. Na *Tabela 5.18* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.20*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a simetria das funções de pertinência. Na *Tabela 5.19*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabelas 4.21*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência dos valores intermediários para gaussiana. Na *Tabela 5.20*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.22*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência de todos os valores, para gaussiana. Na *Tabela 5.21*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.23*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência de todos os valores, para trapezoidais.
- 9 valores fuzzy para cada variável lingüística: inicialmente utilizamos funções de pertinência trap-tri-trap, inferência *max-min* e *max-produto*. Estes resultados foram obtidos através do cálculo da “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.25*. Seus resultados constam da *Tabela 5.22*. Na *Tabela 5.23* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.26*, mantendo as mesmas condições iniciais e aumentando a faixa dos valores da função de pertinência. Na *Tabela 5.24* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre

os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.27*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a simetria das funções de pertinência. Na *Tabela 5.25*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.28*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência dos valores intermediários para gaussiana. Na *Tabela 5.26*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.29*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência de todos os valores, para gaussiana. Na *Tabela 5.27*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.30*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência de todos os valores, para trapezoidais.

d) Regras do Tipo II

- 3 valores fuzzy para cada variável lingüística: inicialmente utilizamos funções de pertinência trap-tri-trap, inferência *max-min* e *max-produto*. Estes resultados foram obtidos através do cálculo da “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.32*. Seus resultados constam da *Tabela 5.28*. Na *Tabela 5.29* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.33*, mantendo as mesmas condições iniciais e aumentando a faixa dos valores da função de pertinência. Na *Tabela 5.30* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.34*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a simetria das funções de pertinência. Na *Tabela 5.31*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.35*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência dos valores intermediários para gaussiana. Na *Tabela 5.32*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.36*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência de todos os valores, para gaussiana. Na *Tabela 5.33*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados

de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.37*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência de todos os valores, para trapezoidais.

- 5 valores fuzzy para cada variável lingüística: inicialmente utilizamos funções de pertinência trap-tri-trap, inferência *max-min* e *max-produto*. Estes resultados foram obtidos através do cálculo da “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.39*. Seus resultados constam da *Tabela 5.34*. Na *Tabela 5.35* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.40*, mantendo as mesmas condições iniciais e aumentando a faixa dos valores da função de pertinência. Na *Tabela 5.36* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.41*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a simetria das funções de pertinência. Na *Tabela 5.37*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.42*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência dos valores intermediários para gaussiana. Na *Tabela 5.38*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.43*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência de todos os valores, para gaussiana. Na *Tabela 5.39*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.44*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência de todos os valores, para trapezoidais.
- 7 valores fuzzy para cada variável lingüística: inicialmente utilizamos funções de pertinência trap-tri-trap, inferência *max-min* e *max-produto*. Estes resultados foram obtidos através do cálculo da “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.46*. Seus resultados constam da *Tabela 5.40*. Na *Tabela 5.41* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.47*, mantendo as mesmas condições iniciais e aumentando a faixa dos valores da função de pertinência. Na *Tabela 5.42* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.48*,

mantendo as mesmas condições iniciais e variando a simetria das funções de pertinência. Na *Tabela 5.43*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.49*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência dos valores intermediários para gaussiana. Na *Tabela 5.44*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.50*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência de todos os valores, para gaussiana. Na *Tabela 5.45*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados na *Tabela 4.51*, mantendo as mesmas condições iniciais e variando a função de pertinência de todos os valores, para trapezoidais.

É importante ressaltar que os experimentos realizados, com funções de pertinências sigmoidais, apresentaram resultados com desvios muito altos, para ambos os tipos de regras, mostrando que esta função não deve ser utilizada para fins comparativos dos resultados, portanto seus resultados de desvios foram mantidos em tabelas e se encontram no *Anexo VI (Tabelas AVI.1 a AVI.7)*.

Em cada tabela de resultados de distancias “Euclidianas” (5.3 a 5.45), constam também os resultados dos desvios médios calculados ($d^m(A,B)$) e seus valores de pertinência calculados ($\mu_{A_p}(d^m(A,B))$) com base em (5.6). Com base em (5.6), também foram calculados os valores de pertinência ($\mu_{A_p}(c)$) para o indicador de complexidade (c) e seus valores são mostrados a seguir:

Para $c = 2,20; 3,22; 3,30; 3,89; 4,39; 4,82; 5,84; 6,59$ temos $\mu_{A_p}(c) = 1,000; 0,768; 0,749; 0,615; 0,501; 0,403; 0,171; 0,000$ para 9, 25, 27, 49, 81, 125, 343 e 729 regras, respectivamente. Embora não tenhamos realizado experimentos com 729 regras, este valor foi incluído no cálculo de pertinência para evitar o nível de pertinência 0,000 para 343 regras.

Com base em (5.4), serão escolhidos os *máximos* entre os *mínimos* de $(\mu_{A_p}(d^m(A,B)), \mu_{A_p}(c))$ cujo resultado indicará a qualidade do modelo fuzzy do ponto de vista destes dois indicadores. Quanto maior for a pertinência $\mu_{A_p}(d^m(A,B))$ e $\mu_{A_p}(c)$, melhores podem ser considerados os resultados em análise.

5.4.1. Resultados dos desvios, desvios médios e pertinências

- a) Tabelas de resultados de distâncias Euclidianas, desvios médios e valor de pertinência para regras do Tipo I:

Tabela 5.3 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
<i>J</i>	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,066	0,081	0,131	0,261	0,001	0,046	0,071	0,131	0,131	0,131
2	0,102	0,044	0,111	0,014	0,236	0,048	0,006	0,161	0,086	0,236
3	0,100	0,039	0,116	0,009	0,241	0,049	0,011	0,166	0,091	0,241
4	0,097	0,051	0,129	0,001	0,259	0,007	0,049	0,184	0,109	0,169
5	0,185	0,160	0,075	0,000	0,150	0,175	0,160	0,075	0,000	0,150
$d^m(A,B)$	0,110	0,075	0,112	0,057	0,177	0,065	0,059	0,143	0,083	0,185
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,465	0,640	0,455	0,730	0,130	0,690	0,720	0,300	0,600	0,090

Tabela 5.4 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), aumentando a faixa dos valores da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
<i>J</i>	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,077	0,081	0,131	0,261	0,001	0,058	0,071	0,131	0,131	0,131
2	0,152	0,104	0,111	0,014	0,236	0,099	0,044	0,161	0,086	0,236
3	0,149	0,099	0,116	0,009	0,241	0,098	0,049	0,166	0,091	0,241
4	0,139	0,101	0,129	0,001	0,259	0,059	0,001	0,184	0,109	0,259
5	0,207	0,190	0,075	0,000	0,150	0,207	0,190	0,075	0,000	0,150
$d^m(A,B)$	0,145	0,115	0,112	0,057	0,177	0,104	0,071	0,143	0,083	0,203
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,290	0,440	0,455	0,730	0,130	0,495	0,660	0,300	0,600	0,000

Tabela 5.5 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), variando a simetria da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,124	0,091	0,044	0,009	0,079	0,127	0,091	0,069	0,069	0,069
2	0,171	0,164	0,154	0,314	0,006	0,141	0,124	0,064	0,064	0,064
3	0,170	0,159	0,149	0,309	0,011	0,144	0,129	0,059	0,059	0,059
4	0,162	0,151	0,091	0,181	0,001	0,143	0,131	0,041	0,041	0,041
5	0,272	0,240	0,075	0,000	0,150	0,272	0,240	0,075	0,000	0,150
$d^m(A, B)$	0,180	0,161	0,103	0,163	0,049	0,165	0,143	0,062	0,047	0,077
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,115	0,210	0,500	0,200	0,770	0,190	0,300	0,705	0,780	0,630

Tabela 5.6 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (trap-gauss-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,071	0,091	0,131	0,261	0,001	0,059	0,081	0,131	0,131	0,131
2	0,091	0,024	0,121	0,006	0,236	0,043	0,016	0,161	0,086	0,236
3	0,092	0,029	0,121	0,001	0,241	0,044	0,011	0,166	0,091	0,241
4	0,094	0,041	0,129	0,001	0,259	0,000	0,059	0,184	0,109	0,259
5	0,187	0,160	0,075	0,000	0,150	0,179	0,160	0,075	0,000	0,150
$d^m(A, B)$	0,107	0,069	0,115	0,054	0,177	0,065	0,065	0,143	0,083	0,203
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,480	0,670	0,440	0,745	0,130	0,690	0,690	0,300	0,600	0,000

Tabela 5.7 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,071	0,091	0,131	0,261	0,001	0,061	0,001	0,131	0,131	0,131
2	0,089	0,024	0,121	0,006	0,236	0,044	0,016	0,146	0,146	0,146
3	0,090	0,029	0,121	0,001	0,241	0,045	0,011	0,151	0,151	0,151
4	0,092	0,041	0,129	0,001	0,259	0,000	0,049	0,169	0,169	0,169
5	0,202	0,180	0,090	0,000	0,100	0,190	0,170	0,090	0,090	0,090
$d^m(A, B)$	0,109	0,073	0,118	0,054	0,167	0,068	0,049	0,137	0,137	0,137
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,470	0,650	0,425	0,745	0,180	0,675	0,770	0,330	0,330	0,330

Tabela 5.8 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (trap-trap-trap).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,059	0,081	0,131	0,261	0,001	0,046	0,081	0,131	0,171	0,091
2	0,076	0,014	0,121	0,006	0,236	0,036	0,016	0,161	0,086	0,236
3	0,078	0,019	0,121	0,001	0,241	0,038	0,011	0,166	0,091	0,241
4	0,081	0,031	0,129	0,001	0,259	0,003	0,059	0,184	0,109	0,259
5	0,175	0,160	0,075	0,000	0,150	0,175	0,160	0,075	0,000	0,150
$d^m(A, B)$	0,094	0,061	0,115	0,054	0,177	0,060	0,065	0,143	0,091	0,195
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,545	0,710	0,440	0,745	0,130	0,715	0,690	0,300	0,560	0,040

Tabela 5.9 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap).

Distâncias Euclidianas														
J	max-min							max-produto						
	CA	BA	MM	LM	SM	CS	CM	CA	BA	MM	LM	SM	CS	CM
1	0,004	0,019	0,069	0,009	0,129	0,007	0,002	0,002	0,029	0,069	0,069	0,069	0,004	0,002
2	0,014	0,024	0,064	0,144	0,016	0,009	0,002	0,007	0,024	0,064	0,064	0,064	0,004	0,002
3	0,013	0,029	0,059	0,139	0,021	0,009	0,003	0,007	0,019	0,059	0,059	0,059	0,004	0,003
4	0,007	0,021	0,041	0,081	0,001	0,019	0,010	0,007	0,021	0,041	0,041	0,041	0,029	0,010
5	0,061	0,100	0,100	0,000	0,100	0,061	0,000	0,061	0,100	0,050	0,000	0,100	0,061	0,000
$d^m(A,B)$	0,020	0,039	0,067	0,075	0,053	0,021	0,003	0,017	0,039	0,057	0,047	0,067	0,020	0,003
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,915	0,820	0,680	0,640	0,750	0,910	1,000	0,930	0,820	0,730	0,780	0,680	0,915	1,000

Tabela 5.10 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap).

Distâncias Euclidianas														
J	max-min-produto							max-produto-min						
	CA	BA	MM	LM	SM	CS	CM	CA	BA	MM	LM	SM	CS	CM
1	0,002	0,029	0,006	0,069	0,069	0,004	0,002	0,004	0,019	0,006	0,009	0,129	0,004	0,002
2	0,007	0,024	0,021	0,064	0,064	0,004	0,002	0,007	0,024	0,021	0,144	0,016	0,004	0,002
3	0,007	0,019	0,021	0,059	0,059	0,004	0,003	0,007	0,029	0,021	0,139	0,021	0,004	0,003
4	0,007	0,021	0,007	0,041	0,041	0,029	0,010	0,007	0,021	0,007	0,081	0,001	0,019	0,010
5	0,061	0,100	0,100	0,000	0,100	0,061	0,000	0,061	0,100	0,100	0,000	0,100	0,061	0,000
$d^m(A,B)$	0,017	0,039	0,031	0,047	0,067	0,020	0,003	0,017	0,039	0,031	0,075	0,053	0,018	0,003
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,930	0,820	0,860	0,780	0,680	0,915	1,000	0,930	0,820	0,860	0,640	0,750	0,925	1,000

Tabela 5.11 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), aumentando a faixa dos valores da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
j	Max-min					max-produto				
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,018	0,001	0,069	0,009	0,129	0,005	0,009	0,069	0,069	0,069
2	0,056	0,044	0,064	0,144	0,016	0,031	0,034	0,064	0,064	0,064
3	0,057	0,049	0,059	0,139	0,021	0,031	0,039	0,059	0,059	0,059
4	0,056	0,041	0,041	0,081	0,001	0,013	0,021	0,041	0,041	0,041
5	0,137	0,120	0,050	0,000	0,100	0,137	0,120	0,050	0,000	0,100
$d^m(A,B)$	0,065	0,051	0,057	0,075	0,053	0,043	0,045	0,057	0,047	0,067
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,690	0,760	0,730	0,640	0,750	0,800	0,790	0,730	0,780	0,680

Tabela 5.12 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), variando a simetria da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
j	Max-min					Max-produto				
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,023	0,001	0,059	0,009	0,109	0,003	0,019	0,069	0,069	0,069
2	0,026	0,024	0,084	0,174	0,006	0,011	0,024	0,064	0,064	0,064
3	0,023	0,029	0,079	0,169	0,011	0,011	0,019	0,059	0,059	0,059
4	0,015	0,031	0,051	0,101	0,001	0,006	0,021	0,041	0,041	0,041
5	0,106	0,100	0,050	0,000	0,100	0,106	0,100	0,050	0,000	0,100
$d^m(A,B)$	0,039	0,037	0,065	0,091	0,045	0,027	0,037	0,057	0,047	0,067
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,820	0,830	0,690	0,560	0,790	0,880	0,830	0,730	0,780	0,680

Tabela 5.13 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-gauss-trap).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,002	0,029	0,069	0,009	0,129	0,016	0,039	0,069	0,069	0,069
2	0,020	0,034	0,064	0,144	0,016	0,015	0,034	0,064	0,064	0,064
3	0,020	0,029	0,059	0,139	0,021	0,016	0,039	0,059	0,059	0,059
4	0,022	0,031	0,041	0,081	0,001	0,014	0,031	0,041	0,041	0,041
5	0,107	0,100	0,050	0,000	0,100	0,106	0,100	0,050	0,000	0,100
$d^m(A, B)$	0,034	0,045	0,057	0,075	0,053	0,033	0,049	0,057	0,047	0,067
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,845	0,790	0,730	0,640	0,750	0,850	0,770	0,730	0,780	0,680

Tabela 5.14 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,008	0,029	0,069	0,009	0,129	0,024	0,069	0,069	0,069	0,069
2	0,011	0,024	0,064	0,144	0,016	0,007	0,064	0,064	0,064	0,064
3	0,010	0,019	0,059	0,139	0,021	0,008	0,059	0,059	0,059	0,059
4	0,009	0,021	0,041	0,081	0,001	0,002	0,041	0,041	0,041	0,041
5	0,123	0,110	0,050	0,000	0,100	0,121	0,050	0,050	0,050	0,050
$d^m(A, B)$	0,032	0,041	0,057	0,075	0,053	0,032	0,057	0,057	0,057	0,057
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,855	0,810	0,730	0,640	0,750	0,855	0,730	0,730	0,730	0,730

Tabela 5.15 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-trap-trap).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,002	0,029	0,069	0,009	0,129	0,013	0,039	0,069	0,049	0,089
2	0,010	0,024	0,064	0,144	0,016	0,007	0,034	0,064	0,084	0,044
3	0,009	0,019	0,059	0,139	0,021	0,009	0,029	0,059	0,079	0,039
4	0,010	0,021	0,041	0,081	0,001	0,008	0,021	0,041	0,061	0,021
5	0,106	0,100	0,050	0,000	0,100	0,106	0,100	0,050	0,000	0,100
$d^m(A, B)$	0,027	0,039	0,057	0,075	0,053	0,029	0,045	0,057	0,055	0,059
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,880	0,820	0,730	0,640	0,750	0,870	0,790	0,730	0,740	0,720

Tabela 5.16 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,006	0,009	0,039	0,001	0,079	0,006	0,019	0,039	0,039	0,039
2	0,004	0,006	0,071	0,006	0,136	0,001	0,016	0,071	0,066	0,076
3	0,004	0,001	0,076	0,001	0,151	0,001	0,011	0,076	0,071	0,081
4	0,000	0,011	0,071	0,141	0,001	0,004	0,021	0,071	0,071	0,071
5	0,048	0,040	0,010	0,000	0,020	0,048	0,040	0,010	0,000	0,020
$d^m(A, B)$	0,012	0,013	0,053	0,030	0,077	0,012	0,021	0,053	0,047	0,057
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,955	0,950	0,750	0,865	0,630	0,955	0,910	0,750	0,780	0,730

Tabela 5.17 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), aumentando a faixa dos valores da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
j	Max-min					Max-produto				
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,004	0,009	0,039	0,009	0,069	0,003	0,019	0,039	0,039	0,039
2	0,020	0,004	0,056	0,006	0,106	0,008	0,006	0,066	0,066	0,066
3	0,018	0,009	0,061	0,001	0,121	0,009	0,011	0,071	0,071	0,071
4	0,009	0,011	0,079	0,009	0,149	0,006	0,011	0,089	0,089	0,089
5	0,081	0,070	0,010	0,000	0,020	0,081	0,070	0,010	0,000	0,020
$d^m(A, B)$	0,026	0,021	0,049	0,005	0,093	0,021	0,023	0,055	0,053	0,057
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,885	0,910	0,770	0,990	0,550	0,910	0,900	0,740	0,750	0,730

Tabela 5.18 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), variando a simetria da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
j	Max-min					max-produto				
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,013	0,009	0,064	0,009	0,119	0,004	0,029	0,089	0,089	0,089
2	0,022	0,024	0,074	0,144	0,004	0,017	0,024	0,044	0,044	0,044
3	0,020	0,019	0,069	0,129	0,009	0,018	0,029	0,039	0,039	0,039
4	0,009	0,021	0,031	0,061	0,001	0,016	0,021	0,021	0,021	0,021
5	0,048	0,040	0,010	0,000	0,020	0,048	0,040	0,010	0,000	0,020
$d^m(A, B)$	0,022	0,023	0,050	0,069	0,031	0,021	0,029	0,041	0,048	0,043
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,905	0,900	0,765	0,670	0,860	0,910	0,870	0,810	0,775	0,800

Tabela 5.19 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (trap-gauss-trap).

Distâncias Euclidianas										
j	Max-min					max-produto				
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,008	0,019	0,039	0,011	0,089	0,022	0,029	0,039	0,039	0,039
2	0,004	0,006	0,071	0,006	0,136	0,003	0,026	0,071	0,066	0,076
3	0,005	0,001	0,076	0,001	0,151	0,001	0,011	0,076	0,071	0,081
4	0,006	0,021	0,071	0,141	0,001	0,011	0,031	0,071	0,071	0,071
5	0,075	0,050	0,010	0,000	0,020	0,060	0,050	0,010	0,000	0,020
$d^m(A, B)$	0,020	0,019	0,053	0,032	0,079	0,019	0,029	0,053	0,049	0,057
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,915	0,920	0,750	0,855	0,620	0,920	0,870	0,750	0,770	0,730

Tabela 5.20 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

Distâncias Euclidianas										
j	Max-min					max-produto				
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,009	0,029	0,039	0,001	0,079	0,022	0,029	0,039	0,039	0,039
2	0,004	0,006	0,071	0,006	0,136	0,003	0,026	0,071	0,066	0,076
3	0,005	0,001	0,076	0,001	0,001	0,001	0,011	0,076	0,071	0,081
4	0,006	0,021	0,071	0,141	0,141	0,011	0,031	0,071	0,071	0,071
5	0,075	0,050	0,020	0,000	0,040	0,060	0,050	0,020	0,020	0,020
$d^m(A, B)$	0,020	0,021	0,055	0,030	0,079	0,019	0,029	0,055	0,053	0,057
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,915	0,910	0,740	0,865	0,620	0,920	0,870	0,740	0,750	0,730

Tabela 5.21 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (trap-trap-trap).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,005	0,019	0,034	0,011	0,079	0,015	0,029	0,039	0,029	0,049
2	0,001	0,016	0,071	0,006	0,136	0,004	0,026	0,071	0,056	0,086
3	0,002	0,001	0,076	0,001	0,151	0,001	0,011	0,076	0,061	0,091
4	0,002	0,011	0,071	0,141	0,001	0,006	0,021	0,071	0,081	0,061
5	0,048	0,040	0,010	0,000	0,020	0,048	0,040	0,010	0,000	0,020
$d^m(A, B)$	0,012	0,017	0,052	0,032	0,077	0,015	0,025	0,053	0,045	0,061
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,955	0,930	0,755	0,855	0,630	0,940	0,890	0,750	0,790	0,710

Tabela 5.22 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 9 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,004	0,001	0,006	0,051	0,039	0,002	0,001	0,006	0,011	0,001
2	0,005	0,004	0,014	0,024	0,004	0,003	0,014	0,014	0,014	0,014
3	0,003	0,009	0,009	0,009	0,009	0,003	0,009	0,009	0,009	0,009
4	0,003	0,001	0,001	0,001	0,019	0,008	0,009	0,009	0,009	0,009
5	0,036	0,030	0,030	0,000	0,010	0,036	0,030	0,005	0,000	0,010
$d^m(A, B)$	0,010	0,009	0,012	0,017	0,016	0,010	0,013	0,009	0,009	0,009
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,965	0,970	0,955	0,930	0,935	0,965	0,950	0,970	0,970	0,970

Tabela 5.23 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 9 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), aumentando a faixa dos valores da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,016	0,011	0,009	0,031	0,049	0,007	0,001	0,009	0,009	0,009
2	0,018	0,004	0,001	0,004	0,006	0,008	0,004	0,006	0,006	0,006
3	0,022	0,009	0,006	0,001	0,011	0,009	0,001	0,011	0,011	0,011
4	0,021	0,001	0,029	0,001	0,059	0,010	0,019	0,029	0,029	0,029
5	0,062	0,050	0,005	0,000	0,010	0,053	0,040	0,005	0,000	0,010
$d^m(A, B)$	0,028	0,015	0,010	0,007	0,027	0,017	0,013	0,012	0,011	0,013
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,875	0,940	0,965	0,980	0,880	0,930	0,950	0,955	0,960	0,950

Tabela 5.24 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 9 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), variando a simetria da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,020	0,019	0,044	0,009	0,079	0,022	0,029	0,059	0,059	0,059
2	0,017	0,016	0,021	0,024	0,066	0,015	0,016	0,036	0,036	0,036
3	0,016	0,011	0,026	0,019	0,071	0,016	0,021	0,041	0,041	0,041
4	0,006	0,009	0,044	0,001	0,089	0,020	0,029	0,059	0,059	0,059
5	0,047	0,050	0,040	0,000	0,080	0,047	0,050	0,040	0,000	0,080
$d^m(A, B)$	0,021	0,021	0,035	0,011	0,077	0,024	0,029	0,047	0,039	0,055
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,910	0,910	0,840	0,960	0,630	0,895	0,870	0,780	0,820	0,740

Tabela 5.25 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 9 valores fuzzy e função de pertinência (trap-gauss-trap).

Distâncias Euclidianas										
J	Max-min					max-produto				
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,000	0,001	0,006	0,051	0,039	0,003	0,001	0,006	0,011	0,001
2	0,003	0,014	0,014	0,024	0,004	0,007	0,014	0,014	0,014	0,014
3	0,003	0,009	0,009	0,009	0,009	0,005	0,009	0,009	0,009	0,009
4	0,001	0,009	0,009	0,001	0,019	0,011	0,009	0,009	0,009	0,009
5	0,055	0,040	0,040	0,000	0,010	0,044	0,030	0,005	0,000	0,010
$d^m(A, B)$	0,012	0,015	0,016	0,017	0,016	0,014	0,013	0,009	0,009	0,009
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,955	0,940	0,935	0,930	0,935	0,945	0,950	0,970	0,970	0,970

Tabela 5.26 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 9 valores fuzzy e função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

Distâncias Euclidianas										
j	Max-min					max-produto				
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,000	0,001	0,006	0,051	0,039	0,003	0,001	0,006	0,011	0,001
2	0,003	0,014	0,014	0,024	0,004	0,007	0,014	0,014	0,014	0,014
3	0,003	0,009	0,009	0,009	0,009	0,005	0,009	0,009	0,009	0,009
4	0,001	0,009	0,009	0,001	0,001	0,011	0,009	0,009	0,009	0,009
5	0,055	0,040	0,010	0,000	0,020	0,043	0,010	0,010	0,010	0,010
$d^m(A, B)$	0,012	0,015	0,010	0,017	0,015	0,014	0,009	0,010	0,011	0,009
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,955	0,940	0,965	0,930	0,940	0,945	0,970	0,965	0,960	0,970

Tabela 5.27 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 9 valores fuzzy e função de pertinência (trap-trap-trap).

Distâncias Euclidianas										
j	Max-min					max-produto				
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,006	0,001	0,006	0,051	0,039	0,006	0,001	0,006	0,011	0,001
2	0,011	0,014	0,014	0,024	0,004	0,012	0,014	0,014	0,024	0,004
3	0,009	0,009	0,009	0,019	0,001	0,009	0,009	0,009	0,019	0,001
4	0,009	0,009	0,009	0,001	0,019	0,009	0,009	0,009	0,001	0,019
5	0,036	0,030	0,005	0,000	0,010	0,036	0,030	0,005	0,000	0,010
$d^m(A, B)$	0,014	0,013	0,009	0,019	0,015	0,014	0,013	0,009	0,011	0,007
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,945	0,950	0,970	0,920	0,940	0,945	0,950	0,970	0,960	0,980

b) Tabelas de resultados de distâncias Euclidianas, desvios médios e valor de pertinência para regras do Tipo II

Tabela 5.28 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
<i>j</i>	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,058	0,071	0,131	0,311	0,049	0,046	0,071	0,131	0,131	0,131
2	0,132	0,094	0,081	0,074	0,236	0,048	0,006	0,161	0,086	0,236
3	0,101	0,039	0,116	0,009	0,241	0,049	0,011	0,166	0,091	0,241
4	0,103	0,098	0,038	0,168	0,092	0,083	0,068	0,017	0,058	0,092
5	0,140	0,133	0,078	0,057	0,213	0,118	0,103	0,018	0,057	0,093
$d^m(A, B)$	0,107	0,087	0,089	0,124	0,166	0,069	0,052	0,099	0,085	0,159
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,480	0,580	0,570	0,395	0,185	0,670	0,755	0,520	0,590	0,220

Tabela 5.29 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), aumentando a faixa dos valores da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
<i>J</i>	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,073	0,071	0,131	0,311	0,049	0,058	0,071	0,131	0,131	0,131
2	0,152	0,104	0,111	0,014	0,236	0,099	0,044	0,161	0,086	0,236
3	0,149	0,099	0,116	0,009	0,241	0,098	0,049	0,166	0,091	0,240
4	0,134	0,128	0,038	0,168	0,092	0,116	0,098	0,017	0,058	0,092
5	0,170	0,163	0,083	0,057	0,223	0,150	0,133	0,018	0,057	0,093
$d^m(A, B)$	0,136	0,113	0,096	0,112	0,168	0,104	0,079	0,099	0,085	0,158
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,335	0,450	0,535	0,455	0,175	0,495	0,620	0,520	0,590	0,225

Tabela 5.30 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), variando a simetria da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
<i>J</i>	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,107	0,081	0,044	0,009	0,079	0,110	0,081	0,069	0,069	0,069
2	0,171	0,164	0,154	0,314	0,006	0,141	0,124	0,064	0,064	0,064
3	0,170	0,159	0,149	0,309	0,011	0,144	0,129	0,059	0,059	0,059
4	0,151	0,078	0,003	0,098	0,092	0,044	0,028	0,058	0,058	0,092
5	0,254	0,213	0,038	0,057	0,133	0,232	0,193	0,057	0,057	0,093
$d^m(A, B)$	0,171	0,139	0,078	0,157	0,064	0,134	0,111	0,061	0,061	0,075
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,160	0,320	0,625	0,230	0,695	0,345	0,460	0,710	0,710	0,640

Tabela 5.31 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (trap-gauss-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,067	0,081	0,131	0,311	0,049	0,063	0,091	0,131	0,131	0,131
2	0,085	0,014	0,116	0,004	0,236	0,035	0,026	0,141	0,056	0,226
3	0,084	0,019	0,121	0,001	0,241	0,036	0,021	0,146	0,061	0,231
4	0,108	0,098	0,038	0,168	0,092	0,079	0,068	0,003	0,088	0,082
5	0,129	0,113	0,063	0,057	0,183	0,104	0,093	0,038	0,037	0,113
$d^m(A,B)$	0,095	0,065	0,094	0,108	0,160	0,063	0,060	0,092	0,075	0,157
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,540	0,690	0,545	0,475	0,215	0,700	0,715	0,555	0,640	0,230

Tabela 5.32 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,061	0,071	0,131	0,311	0,049	0,061	0,081	0,131	0,131	0,131
2	0,089	0,024	0,121	0,006	0,236	0,044	0,016	0,146	0,146	0,146
3	0,090	0,029	0,121	0,001	0,241	0,045	0,011	0,151	0,151	0,151
4	0,129	0,108	0,038	0,168	0,092	0,102	0,078	0,002	0,002	0,002
5	0,140	0,133	0,078	0,057	0,213	0,160	0,133	0,063	0,057	0,183
$d^m(A,B)$	0,102	0,073	0,098	0,109	0,166	0,082	0,064	0,099	0,097	0,123
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,505	0,650	0,525	0,470	0,185	0,605	0,695	0,520	0,530	0,400

Tabela 5.33 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (trap-trap-trap).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,046	0,061	0,131	0,311	0,049	0,053	0,081	0,131	0,201	0,061
2	0,042	0,006	0,121	0,006	0,236	0,012	0,036	0,141	0,056	0,226
3	0,046	0,011	0,121	0,001	0,241	0,015	0,031	0,146	0,061	0,231
4	0,093	0,088	0,038	0,168	0,092	0,078	0,068	0,003	0,088	0,082
5	0,111	0,103	0,063	0,057	0,183	0,098	0,093	0,038	0,037	0,113
$d^m(A,B)$	0,068	0,054	0,095	0,109	0,160	0,051	0,062	0,092	0,089	0,143
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,675	0,745	0,540	0,470	0,215	0,760	0,705	0,555	0,570	0,300

Tabela 5.34 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,001	0,009	0,119	0,009	0,229	0,001	0,009	0,119	0,119	0,119
2	0,013	0,014	0,014	0,124	0,096	0,013	0,014	0,014	0,014	0,014
3	0,008	0,009	0,009	0,119	0,101	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
4	0,008	0,012	0,062	0,032	0,092	0,008	0,022	0,067	0,042	0,092
5	0,036	0,033	0,007	0,043	0,043	0,027	0,013	0,032	0,057	0,007
$d^m(A,B)$	0,013	0,015	0,042	0,065	0,112	0,012	0,013	0,048	0,048	0,048
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,950	0,940	0,805	0,690	0,455	0,955	0,950	0,775	0,775	0,775

Tabela 5.35 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), aumentando a faixa dos valores da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,018	0,001	0,069	0,009	0,129	0,005	0,009	0,069	0,069	0,069
2	0,056	0,044	0,064	0,144	0,016	0,031	0,034	0,064	0,064	0,064
3	0,055	0,049	0,059	0,139	0,021	0,031	0,039	0,059	0,059	0,059
4	0,097	0,068	0,022	0,048	0,092	0,050	0,038	0,042	0,008	0,092
5	0,089	0,083	0,018	0,057	0,093	0,080	0,063	0,007	0,057	0,043
$d^m(A, B)$	0,063	0,049	0,046	0,079	0,070	0,039	0,037	0,048	0,051	0,065
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,700	0,770	0,785	0,620	0,665	0,820	0,830	0,775	0,760	0,690

Tabela 5.36 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), variando a simetria da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,009	0,021	0,101	0,201	0,001	0,011	0,031	0,081	0,081	0,081
2	0,001	0,006	0,016	0,084	0,116	0,004	0,006	0,036	0,036	0,036
3	0,004	0,001	0,021	0,079	0,121	0,008	0,011	0,041	0,041	0,041
4	0,018	0,002	0,047	0,002	0,092	0,008	0,022	0,067	0,042	0,092
5	0,039	0,033	0,008	0,057	0,073	0,026	0,013	0,032	0,057	0,007
$d^m(A, B)$	0,014	0,013	0,039	0,085	0,081	0,011	0,017	0,051	0,051	0,051
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,945	0,950	0,820	0,590	0,610	0,960	0,930	0,760	0,760	0,760

Tabela 5.37 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-gauss-trap).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,002	0,009	0,119	0,009	0,229	0,002	0,019	0,119	0,119	0,119
2	0,040	0,024	0,014	0,124	0,096	0,021	0,014	0,014	0,014	0,014
3	0,038	0,019	0,009	0,119	0,101	0,017	0,009	0,009	0,009	0,009
4	0,027	0,002	0,052	0,012	0,092	0,012	0,022	0,057	0,022	0,092
5	0,060	0,023	0,012	0,057	0,033	0,028	0,013	0,022	0,057	0,013
$d^m(A, B)$	0,033	0,015	0,041	0,064	0,110	0,016	0,015	0,044	0,044	0,049
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,850	0,940	0,810	0,695	0,465	0,935	0,940	0,795	0,795	0,770

Tabela 5.38 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,002	0,009	0,119	0,009	0,229	0,002	0,019	0,119	0,119	0,119
2	0,038	0,024	0,014	0,124	0,096	0,020	0,014	0,014	0,014	0,014
3	0,037	0,019	0,009	0,119	0,101	0,017	0,009	0,009	0,009	0,009
4	0,034	0,002	0,052	0,012	0,092	0,002	0,012	0,057	0,052	0,062
5	0,061	0,023	0,017	0,057	0,023	0,033	0,013	0,022	0,027	0,017
$d^m(A, B)$	0,034	0,015	0,042	0,064	0,108	0,015	0,013	0,044	0,044	0,044
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,845	0,940	0,805	0,695	0,475	0,940	0,950	0,795	0,795	0,795

Tabela 5.39 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-trap-trap).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
<i>J</i>	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,003	0,009	0,119	0,009	0,229	0,005	0,019	0,119	0,079	0,159
2	0,014	0,014	0,014	0,124	0,096	0,014	0,014	0,014	0,054	0,026
3	0,009	0,009	0,009	0,119	0,101	0,009	0,009	0,009	0,049	0,031
4	0,013	0,022	0,052	0,012	0,092	0,014	0,022	0,057	0,022	0,092
5	0,010	0,003	0,017	0,057	0,023	0,007	0,003	0,022	0,057	0,013
$d^m(A, B)$	0,010	0,011	0,042	0,064	0,108	0,010	0,013	0,044	0,052	0,064
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,965	0,960	0,805	0,695	0,475	0,965	0,950	0,795	0,755	0,695

Tabela 5.40 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
<i>J</i>	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,006	0,009	0,039	0,001	0,079	0,006	0,019	0,039	0,039	0,039
2	0,004	0,006	0,071	0,006	0,136	0,001	0,016	0,071	0,066	0,076
3	0,004	0,001	0,076	0,001	0,151	0,001	0,011	0,076	0,071	0,171
4	0,044	0,038	0,057	0,022	0,092	0,031	0,028	0,087	0,082	0,092
5	0,007	0,017	0,042	0,057	0,027	0,009	0,017	0,047	0,057	0,037
$d^m(A, B)$	0,013	0,014	0,057	0,017	0,097	0,010	0,018	0,064	0,063	0,083
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,950	0,945	0,730	0,930	0,530	0,965	0,925	0,695	0,700	0,600

Tabela 5.41 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), aumentando a faixa dos valores da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
<i>J</i>	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,004	0,001	0,019	0,001	0,039	0,000	0,009	0,019	0,019	0,019
2	0,020	0,004	0,036	0,006	0,066	0,006	0,006	0,036	0,036	0,036
3	0,018	0,001	0,041	0,001	0,081	0,006	0,011	0,041	0,041	0,041
4	0,002	0,012	0,047	0,002	0,092	0,011	0,022	0,082	0,072	0,092
5	0,026	0,013	0,037	0,057	0,017	0,024	0,013	0,047	0,057	0,037
$d^m(A, B)$	0,014	0,006	0,036	0,013	0,059	0,009	0,012	0,045	0,045	0,045
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,945	0,985	0,835	0,950	0,720	0,970	0,955	0,790	0,790	0,790

Tabela 5.42 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (trap-tri-trap), variando a simetria da função de pertinência.

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
<i>J</i>	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,010	0,009	0,059	0,009	0,109	0,004	0,029	0,069	0,069	0,069
2	0,143	0,124	0,074	0,124	0,024	0,129	0,104	0,064	0,064	0,064
3	0,008	0,019	0,074	0,139	0,009	0,008	0,019	0,059	0,059	0,059
4	0,032	0,008	0,057	0,022	0,092	0,012	0,012	0,077	0,062	0,092
5	0,003	0,003	0,012	0,057	0,033	0,004	0,007	0,027	0,057	0,003
$d^m(A, B)$	0,039	0,033	0,055	0,070	0,053	0,031	0,034	0,059	0,062	0,057
$\mu_{A_p}(d^m(A, B))$	0,820	0,850	0,740	0,665	0,750	0,860	0,845	0,720	0,705	0,730

Tabela 5.43 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (trap-gauss-trap).

Distâncias Euclidianas										
	Max-min					max-produto				
<i>J</i>	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,004	0,019	0,039	0,009	0,069	0,017	0,029	0,039	0,039	0,039
2	0,004	0,006	0,071	0,006	0,136	0,003	0,026	0,071	0,066	0,076
3	0,005	0,001	0,076	0,001	0,151	0,001	0,011	0,076	0,071	0,081
4	0,043	0,038	0,057	0,022	0,092	0,027	0,018	0,077	0,062	0,092
5	0,017	0,007	0,037	0,057	0,017	0,000	0,017	0,037	0,057	0,017
$d^m(A,B)$	0,015	0,014	0,056	0,019	0,093	0,010	0,020	0,060	0,059	0,061
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,940	0,945	0,735	0,920	0,550	0,965	0,915	0,715	0,720	0,710

Tabela 5.44 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (gauss-gauss-gauss).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
<i>J</i>	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,004	0,019	0,039	0,001	0,079	0,017	0,029	0,039	0,039	0,039
2	0,004	0,006	0,071	0,006	0,136	0,003	0,026	0,071	0,066	0,076
3	0,005	0,001	0,076	0,001	0,151	0,001	0,011	0,076	0,071	0,081
4	0,042	0,028	0,057	0,022	0,092	0,027	0,028	0,082	0,082	0,082
5	0,018	0,007	0,042	0,057	0,027	0,002	0,017	0,037	0,037	0,037
$d^m(A,B)$	0,015	0,012	0,057	0,017	0,097	0,010	0,022	0,061	0,059	0,063
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,940	0,955	0,730	0,930	0,530	0,965	0,905	0,710	0,720	0,700

Tabela 5.45 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (trap-trap-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
<i>J</i>	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,028	0,039	0,039	0,001	0,079	0,032	0,039	0,039	0,009	0,069
2	0,002	0,016	0,071	0,006	0,136	0,006	0,026	0,071	0,046	0,096
3	0,001	0,011	0,076	0,001	0,151	0,001	0,011	0,076	0,051	0,101
4	0,029	0,018	0,057	0,022	0,092	0,019	0,008	0,072	0,052	0,092
5	0,013	0,017	0,037	0,057	0,017	0,013	0,017	0,037	0,057	0,017
$d^m(A,B)$	0,015	0,020	0,056	0,017	0,095	0,014	0,020	0,059	0,043	0,075
$\mu_{A_p}(d^m(A,B))$	0,940	0,915	0,735	0,930	0,540	0,945	0,915	0,720	0,800	0,640

5.5. Preparação das informações para avaliação final

Esta seção é dedicada a preparação das informações de maneira a permitir as avaliações em relação à qualidade dos resultados obtidos nos experimentos realizados neste trabalho, considerando os pontos de vista de adequação dos modelos fuzzy e a complexidade computacional. Conforme visto anteriormente, a avaliação do ponto de vista de adequação é baseada na análise comparativa entre os resultados obtidos nos experimentos realizados e os valores “padrões” calculados com base na teoria de tomada de decisão multicritério em

ambiente fuzzy (*Tabela 5.1*) para regras do tipo I, e (*Tabela 5.2*) para regras do tipo II. Para essa avaliação são considerados os resultados dos cálculos das “distâncias Euclidianas” (*Tabelas de 5.3 a 5.45*) entre os valores “padrões” (*Tabela 5.1*), (*Tabela 5.2*) e os resultados de defuzzyficação obtidos nos experimentos realizados (*Tabelas de 4.3 a 4.51*). A avaliação do ponto de vista de complexidade leva em consideração os indicadores de complexidade c estimada pelo número p de regras que compõem a base de conhecimento.

Mostraremos abaixo os resultados baseados em tomada de decisões multicritério em ambiente fuzzy (5.4), com base em dois critérios (adequação e complexidade), o qual nos permitirá distinguir quais os métodos apresentaram melhores resultados.

Para exemplificar, foram consideradas algumas das tabelas de resultados de desvios (*Tabelas 5.3, 5.9, 5.10, 5.16 e 5.22*), devendo, de maneira análoga, ser pensado para as demais tabelas:

Tabela 5.3:

- 3 valores fuzzy (max-min)
 - max-min (CA) = $\min(0,465, 1,000) = 0,465$
 - max-min (BA) = $\min(0,640, 1,000) = 0,640$
 - max-min (MM) = $\min(0,455, 1,000) = 0,455$
 - max-min (LM) = $\min(0,730, 1,000) = 0,730$
 - max-min (SM) = $\min(0,130, 1,000) = 0,130$máximo dos mínimos = 0,730 – LM

- 3 valores fuzzy (max-produto)
 - max-produto (CA) = $\min(0,690, 1,000) = 0,690$
 - max-produto (BA) = $\min(0,720, 1,000) = 0,720$
 - max-produto (MM) = $\min(0,300, 1,000) = 0,300$
 - max-produto (LM) = $\min(0,600, 1,000) = 0,600$
 - max-produto (SM) = $\min(0,090, 1,000) = 0,090$máximo dos mínimos = 0,720 - BA

Como pode ser observado acima, o resultado obtido (tanto para *max-min* como para *max-produto*) mostra um nível de adequação que de maneira geral não é alto, embora mostre muito bom nível de complexidade.

Tabela 5.9:

- 5 valores fuzzy (max-min)
 - max-min (CA) = $\min(0,915, 0,768) = 0,768$
 - max-min (BA) = $\min(0,820, 0,768) = 0,768$
 - max-min (MM) = $\min(0,680, 0,768) = 0,680$
 - max-min (LM) = $\min(0,640, 0,768) = 0,640$
 - max-min (SM) = $\min(0,750, 0,768) = 0,750$
 - max-produto (CS) = $\min(0,910, 0,768) = 0,768$
 - max-produto (CM) = $\min(1,000, 0,768) = 0,768$máximo dos mínimos = 0,768 – CM, CA e CS

- 5 valores fuzzy (max-produto)
 - max-produto (CA) = $\min(0,930, 0,768) = 0,768$
 - max-produto (BA) = $\min(0,820, 0,768) = 0,768$
 - max-produto (MM) = $\min(0,730, 0,768) = 0,730$
 - max-produto (LM) = $\min(0,780, 0,768) = 0,768$
 - max-produto (SM) = $\min(0,680, 0,768) = 0,680$
 - max-produto (CS) = $\min(0,915, 0,768) = 0,768$
 - max-produto (CM) = $\min(1,000, 0,768) = 0,768$máximo dos mínimos = 0,768 - CM, CA e CS

Tabela 5.10:

- 5 valores fuzzy (max-min-produto)
 - max-min-produto (CA) = $\min(0,930, 0,768) = 0,768$
 - max-min-produto (BA) = $\min(0,820, 0,768) = 0,768$
 - max-min-produto (MM) = $\min(0,860, 0,768) = 0,768$
 - max-min-produto (LM) = $\min(0,780, 0,768) = 0,768$
 - max-min-produto (SM) = $\min(0,680, 0,768) = 0,680$
 - max-min-produto (CS) = $\min(0,915, 0,768) = 0,768$

- max-min-produto (CM) = $\min(1,000, 0,768) = 0,768$
máximo dos mínimos = 0,768 - CM, CA e CS

- 5 valores fuzzy (max-produto-min)

- max-produto-min (CA) = $\min(0,930, 0,768) = 0,768$
- max-produto-min (BA) = $\min(0,820, 0,768) = 0,768$
- max-produto-min (MM) = $\min(0,860, 0,768) = 0,768$
- max-produto-min (LM) = $\min(0,640, 0,768) = 0,640$
- max-produto-min (SM) = $\min(0,750, 0,768) = 0,750$
- max-produto-min (CS) = $\min(0,925, 0,768) = 0,768$
- max-produto-min (CM) = $\min(1,000, 0,768) = 0,768$
máximo dos mínimos = 0,768 - CM, CA e CS

Para 5 valores fuzzy, temos um nível de complexidade intermediário. Alguns métodos de defuzzificação apresentaram resultados melhores (CM, CA e CS). A Análise mais detalhada destes resultados serão mostradas posteriormente.

Tabela 5.16

- 7 valores fuzzy (max-min)

- max-min (CA) = $\min(0,955, 0,615) = 0,615$
- max-min (BA) = $\min(0,950, 0,615) = 0,615$
- max-min (MM) = $\min(0,750, 0,615) = 0,615$
- max-min (LM) = $\min(0,865, 0,615) = 0,615$
- max-min (SM) = $\min(0,630, 0,615) = 0,615$
máximo dos mínimos = 0,615 - CA e BA

- 7 valores fuzzy (max-produto)

- max-produto (CA) = $\min(0,955, 0,615) = 0,615$
- max-produto (BA) = $\min(0,910, 0,615) = 0,615$
- max-produto (MM) = $\min(0,750, 0,615) = 0,615$
- max-produto (LM) = $\min(0,780, 0,615) = 0,615$
- max-produto (SM) = $\min(0,730, 0,615) = 0,615$
máximo dos mínimos = 0,615 - CA e BA

Para 7 valores fuzzy, o nível de adequação se mostra melhor para CA e BA, enquanto que o nível de complexidade aumenta.

Tabela 5.22

- 9 valores fuzzy (max-min)
 - max-min (CA) = $\min(0,965, 0,501) = 0,501$
 - max-min (BA) = $\min(0,970, 0,501) = 0,501$
 - max-min (MM) = $\min(0,955, 0,501) = 0,501$
 - max-min (LM) = $\min(0,930, 0,501) = 0,501$
 - max-min (SM) = $\min(0,935, 0,501) = 0,501$
 - máximo dos mínimos = 0,501 - BA, CA, MM, SM e LM

- 9 valores fuzzy (max-produto)
 - max-produto (CA) = $\min(0,965, 0,501) = 0,501$
 - max-produto (BA) = $\min(0,950, 0,501) = 0,501$
 - max-produto (MM) = $\min(0,970, 0,501) = 0,501$
 - max-produto (LM) = $\min(0,970, 0,501) = 0,501$
 - max-produto (SM) = $\min(0,970, 0,501) = 0,501$
 - máximo dos mínimos = 0,501 - MM, LM, SM, CA e BA

Nesse exemplo para 9 valores fuzzy, temos um nível de complexidade alto, embora os níveis de adequação tenha se mostrado melhores para todos os métodos de defuzzyficação utilizados.

Para permitir a avaliação final, os valores de pertinências calculados com base em tomada de decisões multicritério em ambiente fuzzy, para todos os experimentos realizados, serão mostrados nas Tabelas 5.46 a 5.50. Nessa avaliação final, para níveis de adequação, vamos considerar como bons, os resultados de $\mu_{A_p}(d^m(A,B)) \geq 0,900$. Aqueles valores que podem ser considerados como bons do ponto de vista de adequação e de complexidade, serão destacados nessas tabelas.

a) Regras tipo I:

A = trap-tri-trap – 50% de sobreposição

B = trap-tri-trap – aumentando a faixa dos valores das funções de pertinências (70%)

C = trap-tri-trap – variando a simetria das funções de pertinências (70%)

D = trap-gauss-trap – 50% de sobreposição

E = gauss-gauss-gauss – 50% de sobreposição

F = trap-trap-trap - 50% de sobreposição

Tabela 5.46 – Resumo dos resultados de $\mu_{A_p}(d^m(A, B))$ para regras do tipo I, para 3 e 5 valores fuzzy, inferência *max-min* e *max-produto*.

E X P	MAX-MIN					MAX-PRODUTO					MAX-MIN					MAX-PRODUTO								
	3					3					5					5								
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	CS	CM	CA	BA	MM	LM	SM	CS	CM
A	0,465	0,640	0,455	0,730	0,130	0,690	0,720	0,300	0,600	0,090	0,915	0,820	0,680	0,640	0,750	0,910	1,000	0,930	0,820	0,730	0,780	0,680	0,915	1,000
B	0,290	0,440	0,455	0,730	0,130	0,495	0,660	0,300	0,600	0,000	0,690	0,760	0,730	0,640	0,750	-	-	0,800	0,790	0,730	0,780	0,680	-	-
C	0,115	0,210	0,500	0,200	0,770	0,190	0,300	0,705	0,780	0,630	0,820	0,830	0,690	0,560	0,790	-	-	0,880	0,830	0,730	0,780	0,680	-	-
D	0,480	0,670	0,440	0,745	0,130	0,690	0,690	0,300	0,600	0,000	0,845	0,790	0,730	0,640	0,750	-	-	0,850	0,770	0,730	0,780	0,680	-	-
E	0,470	0,650	0,425	0,745	0,180	0,675	0,770	0,330	0,330	0,330	0,855	0,810	0,730	0,640	0,750	-	-	0,855	0,730	0,730	0,730	0,730	-	-
F	0,545	0,710	0,440	0,745	0,130	0,715	0,690	0,300	0,560	0,040	0,880	0,820	0,730	0,640	0,750	-	-	0,870	0,790	0,730	0,740	0,720	-	-

Tabela 5.47 – Resumo dos resultados de $\mu_{A_p}(d^m(A, B))$ para regras do tipo I, para 5 valores fuzzy, inferência *max-min-produto* e *max-produto-min*.

E X P	MAX-MIN-PRODUTO				MAX-PRODUTO-MIN			
	5				5			
	CA	MM	CS	CM	CA	MM	CS	CM
A	0,930	0,860	0,915	1,000	0,930	0,860	0,925	1,000

Tabela 5.48 – Resumo dos resultados de $\mu_{A_p}(d^m(A,B))$ para regras do tipo I, para 7 e 9 valores fuzzy, inferência *max-min* e *max-produto*.

E X P	MAX-MIN					MAX-PRODUTO					MAX-MIN					MAX-PRODUTO				
	7					7					9					9				
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
A	0,955	0,950	0,750	0,865	0,630	0,955	0,910	0,750	0,780	0,730	0,965	0,970	0,955	0,930	0,935	0,965	0,950	0,970	0,970	0,970
B	0,885	0,910	0,770	0,990	0,550	0,910	0,900	0,740	0,750	0,730	0,875	0,940	0,965	0,980	0,880	0,930	0,950	0,955	0,960	0,950
C	0,905	0,900	0,765	0,670	0,860	0,910	0,870	0,810	0,775	0,800	0,910	0,910	0,840	0,960	0,630	0,895	0,870	0,780	0,820	0,740
D	0,915	0,920	0,750	0,855	0,620	0,920	0,870	0,750	0,770	0,730	0,955	0,940	0,935	0,930	0,935	0,945	0,950	0,970	0,970	0,970
E	0,915	0,910	0,740	0,865	0,620	0,920	0,870	0,740	0,750	0,730	0,955	0,940	0,965	0,930	0,940	0,945	0,970	0,965	0,960	0,970
F	0,955	0,930	0,755	0,855	0,630	0,940	0,890	0,750	0,790	0,710	0,945	0,950	0,970	0,920	0,940	0,945	0,950	0,970	0,960	0,980

b) Regras do tipo II:

Tabela 5.49 – Resumo dos resultados de $\mu_{A_p}(d^m(A,B))$ para regras do tipo II, para 3 e 5 valores fuzzy, inferência *max-min* e *max-produto*.

E X P	MAX-MIN					MAX-PRODUTO					MAX-MIN					MAX-PRODUTO				
	3					3					5					5				
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
A	0,480	0,580	0,570	0,395	0,185	0,670	0,755	0,520	0,590	0,220	0,950	0,940	0,805	0,690	0,455	0,955	0,950	0,775	0,775	0,775
B	0,335	0,450	0,535	0,455	0,175	0,495	0,620	0,520	0,590	0,225	0,700	0,770	0,785	0,620	0,665	0,820	0,830	0,775	0,760	0,690
C	0,160	0,320	0,625	0,230	0,695	0,345	0,460	0,710	0,710	0,640	0,945	0,950	0,820	0,590	0,610	0,960	0,930	0,760	0,760	0,760
D	0,540	0,690	0,545	0,475	0,215	0,700	0,715	0,555	0,640	0,230	0,850	0,940	0,810	0,695	0,465	0,935	0,940	0,795	0,795	0,770
E	0,505	0,650	0,525	0,470	0,185	0,605	0,695	0,520	0,530	0,400	0,845	0,940	0,805	0,695	0,475	0,940	0,950	0,795	0,795	0,795
F	0,675	0,745	0,540	0,470	0,215	0,760	0,705	0,555	0,570	0,300	0,965	0,960	0,805	0,695	0,475	0,965	0,950	0,795	0,755	0,695

Tabela 5.50 – Resumo dos resultados de $\mu_{A_p}(d^m(A, B))$ para regras do tipo II, para 7 valores fuzzy, inferência *max-min* e *max-produto*.

E X P	MAX-MIN					MAX-PRODUTO				
	7					7				
	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
A	0,950	0,945	0,730	0,930	0,530	0,965	0,925	0,695	0,700	0,600
B	0,945	0,985	0,835	0,950	0,720	0,970	0,955	0,790	0,790	0,790
C	0,820	0,850	0,740	0,665	0,750	0,860	0,845	0,720	0,705	0,730
D	0,940	0,945	0,735	0,920	0,550	0,965	0,915	0,715	0,720	0,710
E	0,940	0,955	0,730	0,930	0,530	0,965	0,905	0,710	0,720	0,700
F	0,940	0,915	0,735	0,930	0,540	0,945	0,915	0,720	0,800	0,640

Mostraremos a seguir a Tabela 5.51, onde temos um resumo das pertinências com relação aos níveis de complexidade, calculados com base em tomada de decisões multicritério em ambiente fuzzy, para todos os valores fuzzy e número de regras pesquisados neste trabalho.

Tabela 5.51 – Resumo dos resultados de pertinências para níveis de complexidade.

Valores Fuzzy	Nível de complexidade			
	Tipo de regras			
	I		II	
	Nº regras	$\mu_{A_p}(c)$	Nº regras	$\mu_{A_p}(c)$
3	9	1,000	27	0,749
5	25	0,768	125	0,403
7	49	0,615	343	0,171
9	81	0,501	729	0,000

5.6. Avaliação final

Com base nas *Tabelas 5.46 a 5.50*, onde temos informações sobre o nível de adequação e na *Tabela 5.51* onde temos informações sobre os níveis de complexidade, baseando também nos exemplos mostrados na seção anterior, faremos a avaliação integrada de nível de adequação e de complexidade, cujos resultados nos permitirá indicar os procedimentos de lógica fuzzy que melhor representa a solução para o problema o qual é objeto de estudo deste trabalho.

a) Regras do tipo I:

Podemos avaliar de acordo com os resultados da *Tabela 5.51* que o caso em que apresentou melhor nível de complexidade foi aquele em que temos 3 valores fuzzy, porem podemos também observar que o mesmo apresentou o pior nível de adequação (*Tabela 5.46*), portanto será desconsiderado nesta análise.

Para os resultados obtidos com 5 valores fuzzy (*Tabelas 5.46 e 5.47*), os quais possuem um nível de complexidade intermediária (0,768)-(*Tabela 5.51*), podemos notar muito bons resultados para os métodos de defuzzyficação (CM, CA e CS), considerando as quatro inferências adotadas, sendo melhores nas inferências *max-produto* e *max-produto-min*, embora para *max-min* e *max-min-produto* sejam apenas levemente diferentes. Essa consideração relatada nesse parágrafo serve para explicar o caso em que temos as funções de pertinência trapezoidais para as extremidades e triangulares para os valores intermediários e 50 % de sobreposição das funções de pertinência (A), pois foi aquele que apresentou melhor resultado. Para as outras variações dentro de 5 valores fuzzy os resultados se tornaram piores à medida que variamos a base da função de pertinência (o que implicou em aumentar a sobreposição das funções de pertinência de 50% para 70%) e sua simetria. Quando utilizamos a função de pertinência gaussiana para todos os valores fuzzy os resultados, de maneira geral, melhoram um pouco, mas ainda são piores que os obtidos no melhor caso relatado acima, o mesmo ocorre para o caso em que temos funções de pertinência trapezoidais para todos os valores.

Para 7 e 9 valores fuzzy (*Tabela 5.48 e 5.49*), os resultados foram levemente melhores quando comparados a 5 valores fuzzy, porém isso ocorreu para quase todas as variações nas funções de pertinências adotadas e método de defuzzyficação CA e BA, por exemplo. O método MM apresentou muito bons resultados para 9 valores fuzzy, o que não ocorreu para 7 valores fuzzy. Podemos observar que estes resultados melhoram levemente mais à medida que sejam aumentados os valores fuzzy. Houveram também melhorias para alguns casos como quando se tem somente funções gaussianas e somente trapezoidais para todos os valores. É importante ressaltar que embora os resultados considerando o nível de adequação, sejam levemente melhores quanto maior forem os valores fuzzy adotados, os níveis de complexidade (0,615 e 0,501) pioram, o que justifica a não indicação destes casos para a solução de problemas, cujo tempo de processamento computacional é fator importante no processo de controle. Considerando também que seu nível de adequação melhora relativamente pouco para o grande aumento no nível de complexidade. Uma observação igualmente importante se deu em relação ao aumento dos números de valores fuzzy para 9, onde todos os métodos de defuzzyficação utilizados, apresentaram muito bons resultados (MM, LM, SM, CA e BA) nessa ordem para algumas das variações nas funções de pertinências. Todas estas observações podem ser vistas de acordo com os valores de $\mu_{A_p}(c)$ mostrados na *Tabela 5.51* e $\mu_{A_p}(d^m(A,B))$ mostrados na *Tabela 5.48*, onde significa dizer que quanto maior o valor de pertinência de $\mu_{A_p}(d^m(A,B))$ e $\mu_{A_p}(c)$, melhor é o resultado em análise.

b) Regras do tipo II:

Para as regras do tipo II, cujos resultados se encontram nas *Tabelas 5.49 e 5.50*, o comportamento se dá da mesma maneira como para regras do tipo I, porém com níveis de complexidade (*Tabela 5.51*), relativamente maiores por possuir uma variável de entrada a mais. Podemos observar que para 5 valores fuzzy algumas das variações efetuadas apresentam resultados levemente melhores se comparadas com as regras do tipo I, por exemplo, para CA e BA. Já para 7 valores fuzzy isto acontece também para CA, BA e LM considerando a inferência *max-min* e CA e BA para *max-produto* (*Tabela 5.50*). Para o método CA e BA, a maioria das variações, apresentaram bons resultados. Não foram realizados experimentos para 9 valores fuzzy. Como já justificado anteriormente, esse

número de valores fuzzy, para 3 entradas levariam a geração manual de 729 regras, um número bastante elevado para serem gerados manualmente com grau de confiabilidade relevante, além disso vale lembrar que esse número de regras eleva o grau de complexidade de maneira considerável.

Avaliamos algumas considerações em relação ao tempo de processamento, embora o mesmo não tenha sido um fator medido com precisão para o nosso estudo, entretanto suas observações são mostradas a seguir.

Quando processamos regras do tipo I para 9 valores fuzzy, o tempo de processamento da resposta, foi de aproximadamente o dobro do tempo de processamento da resposta medido para 3 valores fuzzy. Quando processamos regras do tipo II para 7 valores fuzzy, o tempo de processamento da resposta, foi aproximadamente 23 vezes maior que o tempo de processamento da resposta para 3 valores fuzzy. Este foi o tempo gasto para processar entradas de apenas um dos dispositivos e apenas um dos métodos de defuzzyficação.

De acordo com as análises mostradas acima, considerando os resultados destacados nas Tabelas 5.46 a 5.50, faremos as seguintes recomendações: para regras do tipo I, podem ser indicados como boa opção para solução do problema objeto desta pesquisa, os procedimentos de lógica fuzzy, que consideram as funções de pertinência trap-tri-trap para cinco valores fuzzy com 50% de sobreposição (A), a inferência *max-produto* e *max-produto-min*, (lembrando que *max-min* e *max-min-produto* são apenas levemente inferiores) e os métodos de defuzzyficação CA, CS e CM. Podemos indicar também para 7 valores fuzzy, as funções de pertinências trap-tri-trap (A) - (CA e BA), tanto para *max-min* quanto *max-produto*. Como pode ser visto na Tabela 5.48, podem ser indicadas também algumas das demais variações em destaque na mesma. Para regras do tipo II, serão indicados apenas os procedimentos de lógica fuzzy para 5 valores fuzzy, dentre os quais, destacamos tanto para inferência *max-min* quanto *max-produto* as funções de pertinências trap-tri-trap (A). O mesmo ocorre para trap-tri-trap com variação de simetria (C) ambas para os métodos de defuzzyficação CA e BA. Como podemos observar na Tabela 5.49, algumas das outras variações também oferecem bons resultados sempre para CA e/ou BA.

Levando em consideração as conclusões apresentadas acima, é possível introduzir a consideração dos resultados dos cálculos do capítulo 3 associados com avaliação dos graus de entropia para diferentes esquemas de inferência fuzzy (*Tabela 3.4*). Essa introdução é racional do ponto de vista da possibilidade de utilizar os resultados do capítulo 3 para sistemas especialistas. Diferentemente de sistemas de controle, na utilização de sistemas especialistas não é necessário dar como saída do sistema o valor único, mas é necessário aproximar os resultados de inferência pelos correspondentes valores fuzzy. Do ponto de vista dessa aproximação os resultados de cálculos das entropias podem servir como uma estimativa da qualidade de aproximação fuzzy [52]. Desta maneira, para distinguirmos entre resultados, para diferentes procedimentos de inferência, os quais sejam apenas levemente diferentes entre si, utilizaremos os resultados de entropia, que no nosso estudo, indicam o uso da inferência *max-produto* e *max-produto-min*.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PROPOSIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões do trabalho

O objetivo geral do presente trabalho é melhorar a eficiência na resolução de um dos mais importantes problemas da engenharia de potência - o controle coordenado “on line” de tensão e potência reativa em ambientes regulamentado e desregulamentado, baseado em integração de abordagens tradicionais, numéricas e a tecnologia da teoria de conjuntos fuzzy (lógica fuzzy). O alcance desse objetivo está associado com amplos e profundos estudos e análises comparativas dos procedimentos de lógica fuzzy, para o aumento da qualidade dos modelos usados e soluções obtidas com sua base para regras típicas incluídas na base de conhecimento do sistema destinado ao controle de tensão e potência reativa.

Para se atingir este objetivo foram dedicados esforços nas seguintes ações:

- a) Análise das regras incluídas na base de conhecimento baseando-se nas regras gerais que refletem as estratégias de controle abrangentes e flexíveis. Essas regras foram definidas, tanto para as regras gerais do tipo I quanto para regras gerais do tipo II. As regras do tipo II são aplicáveis para os diferentes níveis da hierarquia situacional de controle e permitem, já na etapa de controle corretivo, minimizar as perdas do sistema. Também foram discutidas as condições específicas, que refletem a política operacional do sistema de potência e que podem ser refletidas através da utilização de regras gerais do tipo III definidas.
- b) Foram construídas as variáveis lingüísticas, incluídas no modelo fuzzy de acordo com as regras da base de conhecimento. Os intervalos de definição das variáveis de base

dessas variáveis lingüísticas foram definidos com base em considerações substanciais. O número de valores fuzzy das variáveis lingüísticas foi definido com base em simulações para os diferentes casos típicos, bem como variações nas formas das funções de pertinência, nas bases das mesmas e suas simetrias.

- c) Foram estudados os procedimentos de inferência fuzzy baseados no modelo de Mamdani e de Larsen, bem como suas variações, com base no correspondente algoritmo multidimensional da inferência fuzzy. A utilização desse algoritmo evita manipulações com matrizes multidimensionais de relações de implicação, o que justificou a utilização do mesmo neste trabalho. Um software de controle fuzzy (PLF), foi desenvolvido, permitindo a avaliação de alguns dos procedimentos de lógica fuzzy estudados, além disso, foi possível avaliar a qualidade da inferência fuzzy baseado nos conceitos de entropia fuzzy, com base nos detalhamentos dos procedimentos permitidos pelo software PLF. Os experimentos computacionais também foram realizados com base no software Matlab. Da mesma maneira diferentes esquemas de defuzzyficação foram aplicados para que se tornasse possível à avaliação dos mesmos e posteriormente a indicação daquele que representasse a melhor solução para o problema em estudo.

Para avaliação da qualidade dos modelos fuzzy foram delineadas abordagens baseadas nos níveis de adequação e de complexidade dos mesmos. A abordagem associada com adequação do modelo fuzzy está associada com a forte relação entre as regras, incluídas na base de conhecimento, e os modelos de otimização multicritério. Com base nessa abordagem, foi possível construir valores considerados “padrões”, os quais nos permitiram avaliar os desvios entre estes valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação encontrados nos experimentos realizados. Ao mesmo tempo, a abordagem em relação ao nível de complexidade do modelo fuzzy, está relacionada com o número de regras da base de conhecimento. Dessa maneira, a análise integrada dos níveis de adequação e de complexidade, nos permitiu indicar o modelo fuzzy de melhor qualidade do ponto de vista de adequação e complexidade.

Os esforços relacionados nesse tópico permitiram obter os seguintes resultados:

- Regras do tipo I

Para regras do tipo I, podemos indicar como boa solução para o problema em estudo: Função de pertinência trap-tri-trap, 5 valores fuzzy, 50% de sobreposição, inferência *max-produto* e *max-produto-min* e defuzzyficação CA, CS e CM.

Da mesma maneira: Função de pertinência trap-tri-trap, 7 valores fuzzy, 50% de sobreposição, inferência *max-min* e *max-produto* e defuzzyficação CA e BA.

- Regras do tipo II:

Para regras do tipo II, podem ser indicados os seguintes: Função de pertinência trap-tri-trap, 5 valores fuzzy, 50% de sobreposição, inferência *max-min* e *max-produto* e defuzzyficação CA e BA.

Algumas das demais variações analisadas também apresentaram resultados razoáveis, os quais foram destacados no capítulo cinco.

Os resultados desse trabalho servirão como recomendações de utilização numa estrutura de software que serve para a realização das funções EMS. Esse software funciona interagindo com o sistema SCADA do sistema de subtransmissão. Seu aproveitamento vai permitir aumentar a eficiência de controle de tensão e potência reativa satisfazendo objetivos tradicionais (observação das restrições nos níveis de tensão das barras, na capacidade de potência dos elementos das redes e redução das perdas de potência e energia) bem como os seguintes objetivos:

- uso mais efetivo dos equipamentos de regulação de tensão e compensação de potência;

- consideração racional, diretamente no processo de controle, de fatores, metas e restrições, baseados na experiência, intuição e conhecimento dos operadores, os quais têm influência significativa na validade das ações de controle;
- diminuição da carga psicológica intensa e do trabalho rotineiro dos operadores, e conseqüentemente, seu melhor aproveitamento.

6.2. Publicações associadas com esta dissertação

- J.L.T. Morra, R.L.J. Carnevalli, B.M.Mendonça Neta, S.T.M. Costa, A.V.Garcia e P.Ia. Ekel, xOMNI-Sistema SCADA/EMS, **Revista CIER**, Ano IX, No. 41, 2002, pp. 42-48.
- P.Ia. Ekel, R.L.J. Carnevalli, B.M. Mendonça Neta, D.L. Souza, R.M. Palhares, Modelos e métodos de tomada de decisões em ambiente fuzzy e suas aplicações, em **Anais do XXXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Natal**, 2003, pp. 980-990.
- R.L.J. Carnevalli, B.M. Mendonça Neta, R.C. Brito, J.L.T. Morra, A.V. Garcia, P.Ya. Ekel, M.F.D. Junges, D.L. Guidone, and R.M. Palhares, Energy Management System and Fuzzy Control of Voltage and Reactive Power in Subtransmission System, **WSEAS Transactions on Circuit and System**, Vol. 2, No. 3, 2004, pp. 306-311.

6.3. Proposições para trabalhos futuros

Pesquisas futuras diretamente relacionadas com os resultados desta dissertação poderão ser associadas com algumas direções, como:

- a) Avaliação do uso de ferramentas para a obtenção automática de regras da base de conhecimento e sua aplicação para a solução do problema de controle de tensão e potência reativa;
- b) Desenvolvimento da abordagem associada com utilização de técnicas de Tomada de Decisões Multicritério em Ambiente Fuzzy, para o processamento de regras de produção fuzzy;
- c) Avaliação da massa de dados obtidos com os procedimentos de lógica fuzzy, objetivando considerar outros focos que porventura não tenham sido considerados neste trabalho.

ANEXO I

GRÁFICOS DE ALGUMAS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA UTILIZADAS NESSE TRABALHO

a) Regras do tipo I

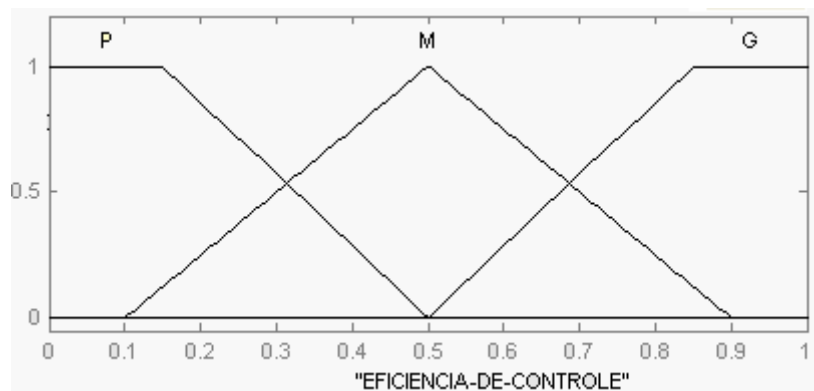


Figura AI.1 – função de pertinência para 3 valores fuzzy
(trap-tri-trap).

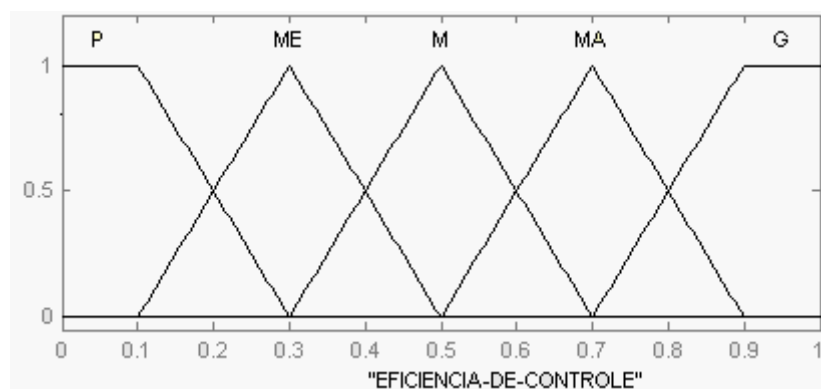


Figura AI.2 – função de pertinência para 5 valores fuzzy
(trap-tri-trap).

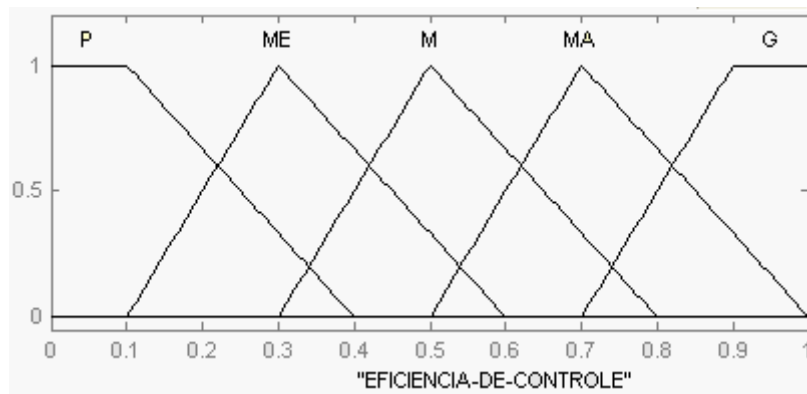


Figura A1.3 – função de pertinência para 5 valores fuzzy, variando a simetria da função de pertinência (trap-tri-trap).

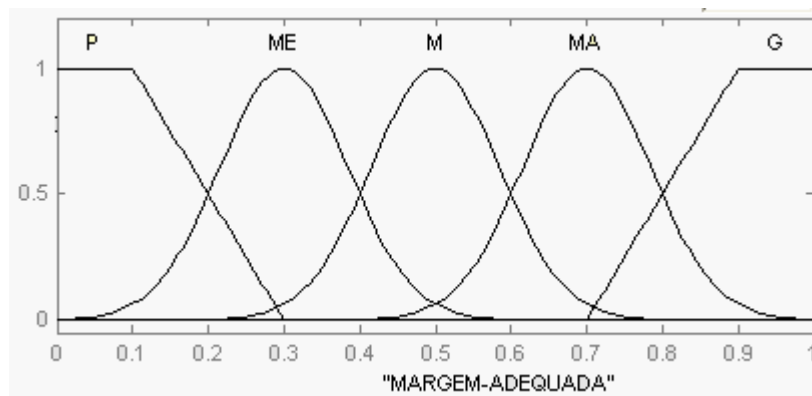


Figura A1.4 – função de pertinência para 5 valores fuzzy (trap-gauss-trap).

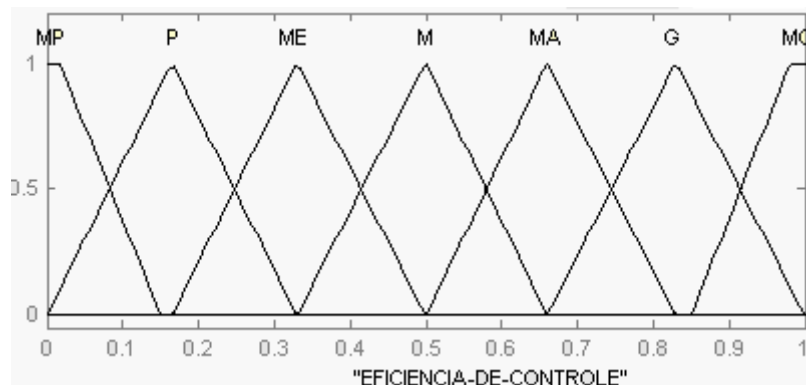


Figura A1.5 – função de pertinência para 7 valores fuzzy (trap-tri-trap).

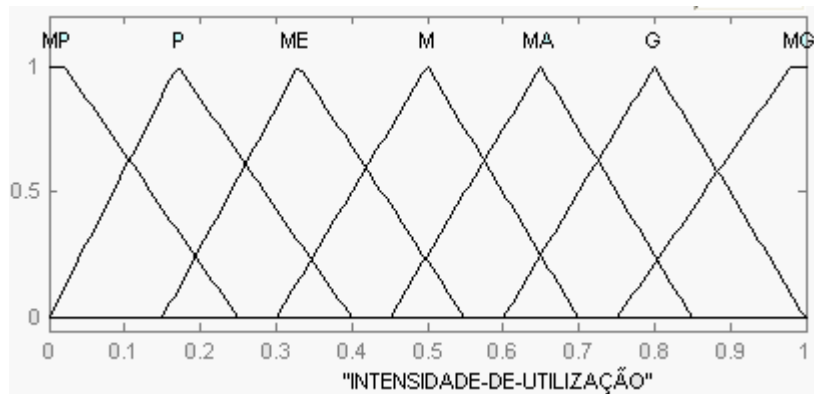


Figura AI.6 – função de pertinência para 7 valores fuzzy (trap-tri-trap), variando a base da função de pertinência.

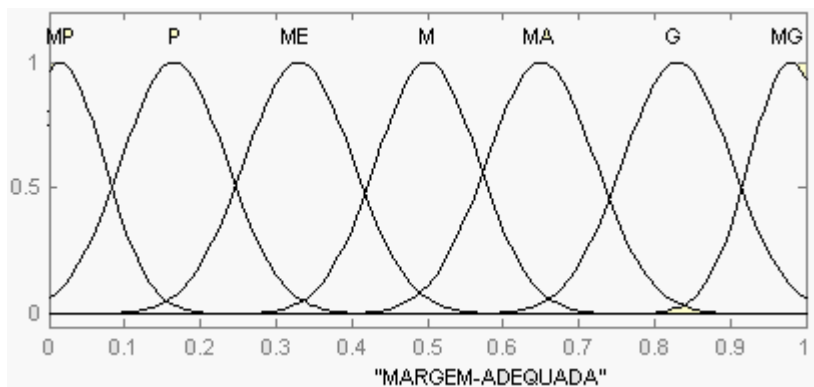


Figura AI.7 – função de pertinência para 7 valores fuzzy (gauss-gauss-gauss).

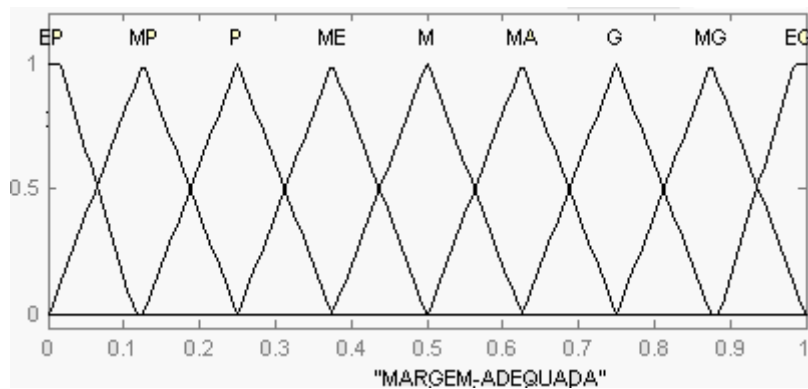


Figura AI.8 – função de pertinência para 9 valores fuzzy (trap-tri-trap).

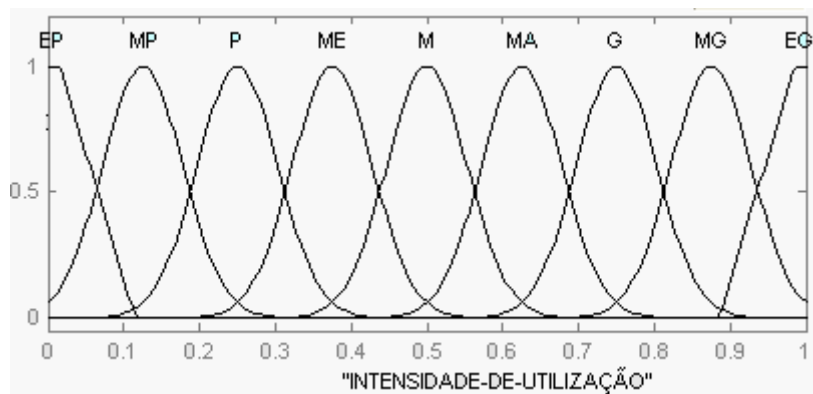


Figura AI.9 – função de pertinência para 9 valores fuzzy (trap-gauss-trap).

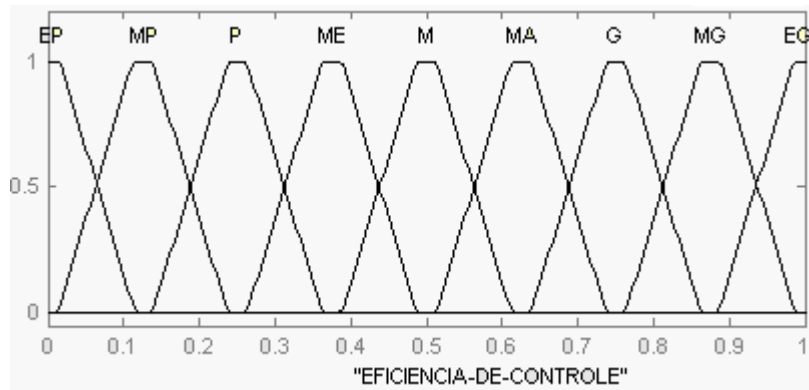


Figura AI.10 – função de pertinência para 9 valores fuzzy (trap-trap-trap).

b) Regras do tipo II

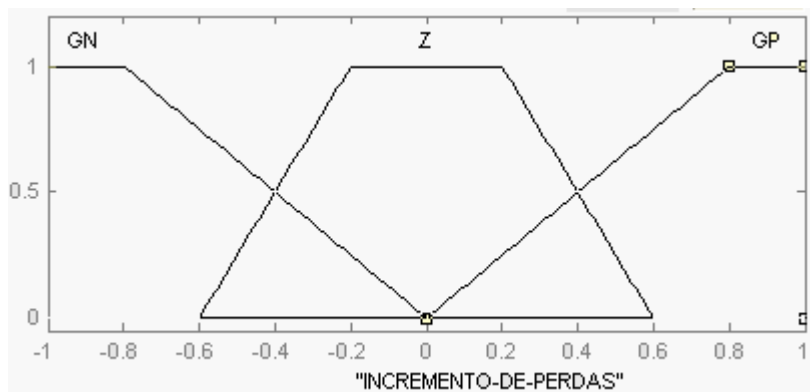


Figura AI.11 – função de pertinência para 3 valores fuzzy (trap-trap-trap).

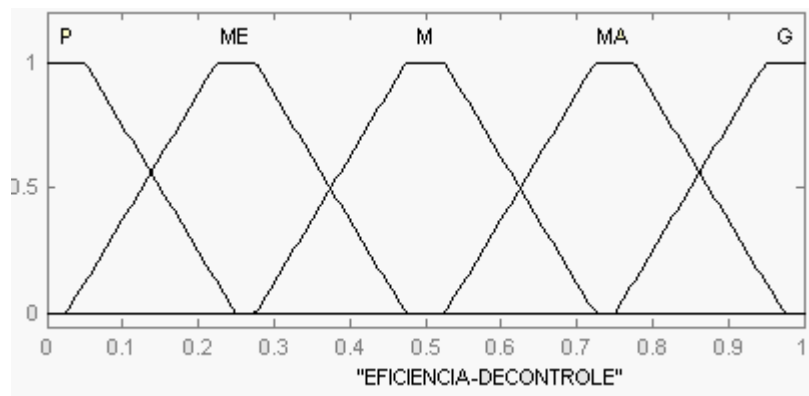


Figura AI.12 – função de pertinência para 5 valores fuzzy (trap-trap-trap).

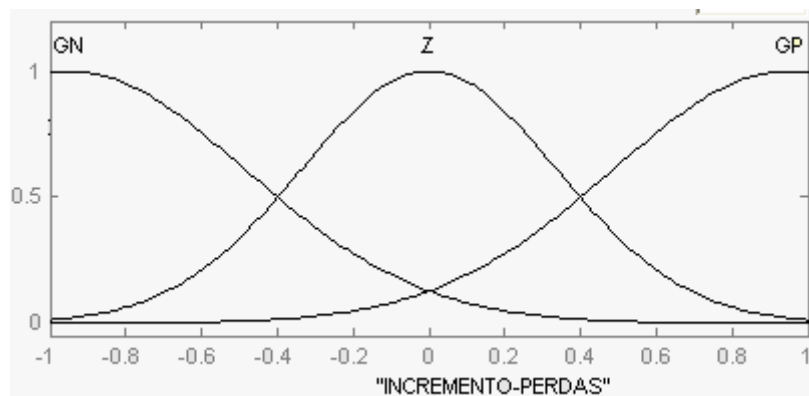


Figura AI.13 – função de pertinência para 3 valores fuzzy (gauss-gauss-gauss).

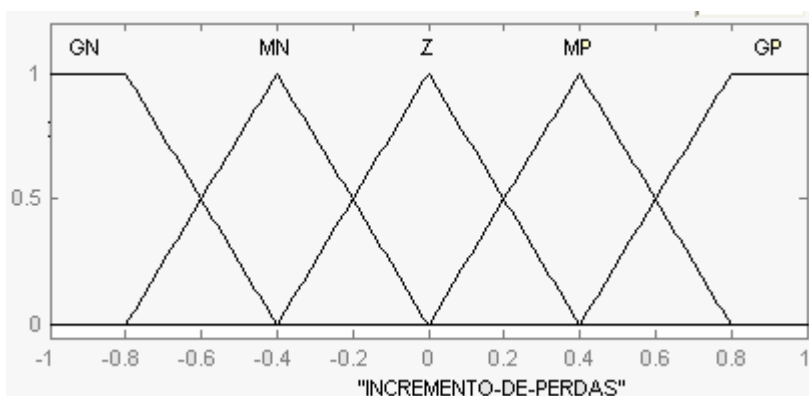


Figura AI.14 – função de pertinência para 5 valores fuzzy (trap-tri-trap).

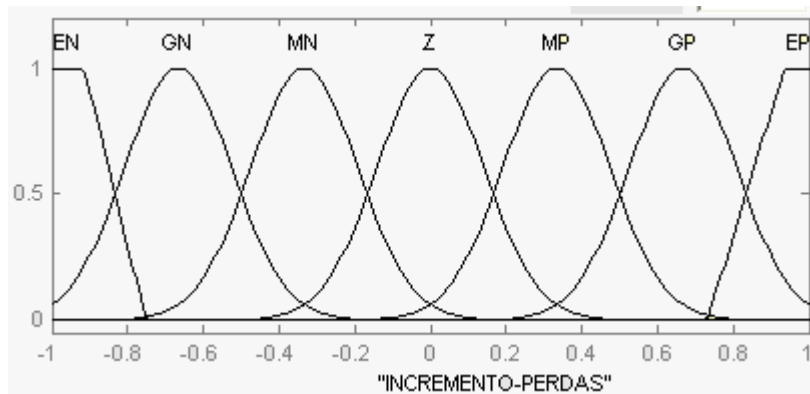


Figura AI.15 – função de pertinência para 7 valores fuzzy (trap-gauss-trap).

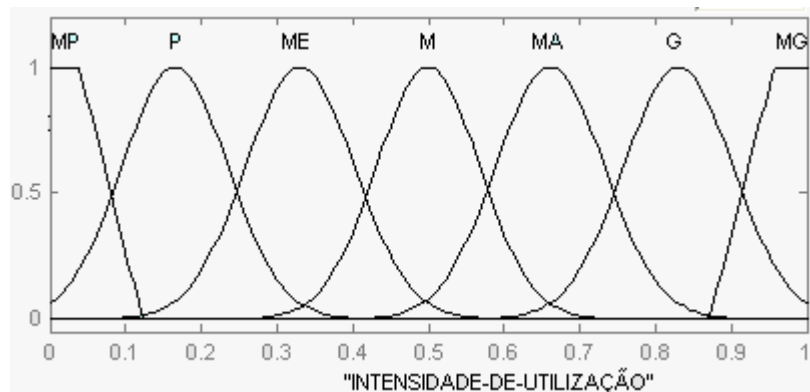


Figura AI.16 – função de pertinência para 7 valores fuzzy (trap-gauss-trap).

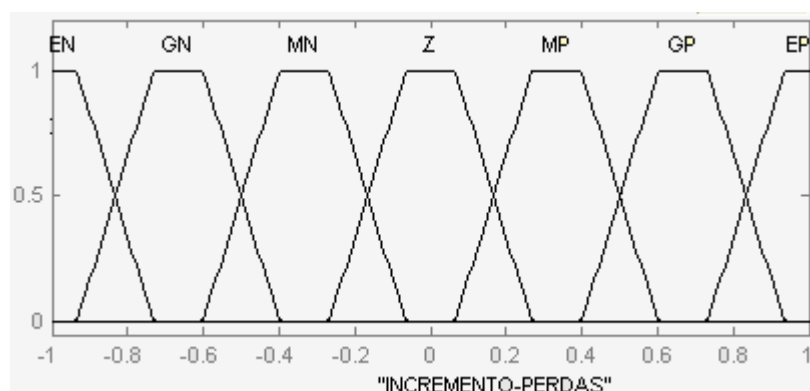


Figura AI.17 – função de pertinência para 7 valores fuzzy (trap-trap-trap).

ANEXO II

GRÁFICOS DE ALGUMAS DAS SUPERFÍCIES DE CONTROLE OBTIDAS

A união das variáveis lingüísticas, seus valores fuzzy, funções de pertinências e as regras da base de conhecimento nos permite construir a chamada *superfície de decisão*, ou *superfície de controle*. Estas superfícies podem ser entendidas como a região por onde a ação de controle varia, ou seja, os valores da ação de controle “caminham” por esta superfície.

As superfícies de controle para alguns dos experimentos realizados se encontram nas figuras que compõem esse anexo.

a) Regras do tipo I

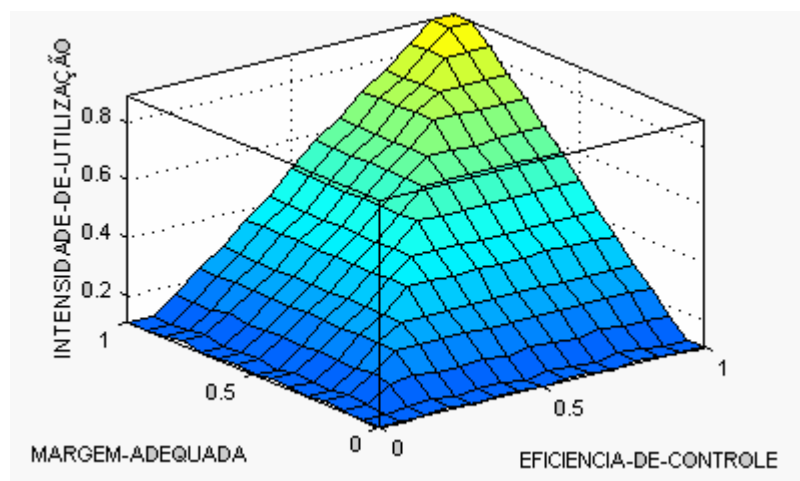


Figura AII.1 – superfície de controle para *max-min* - CA
(5 valores fuzzy).

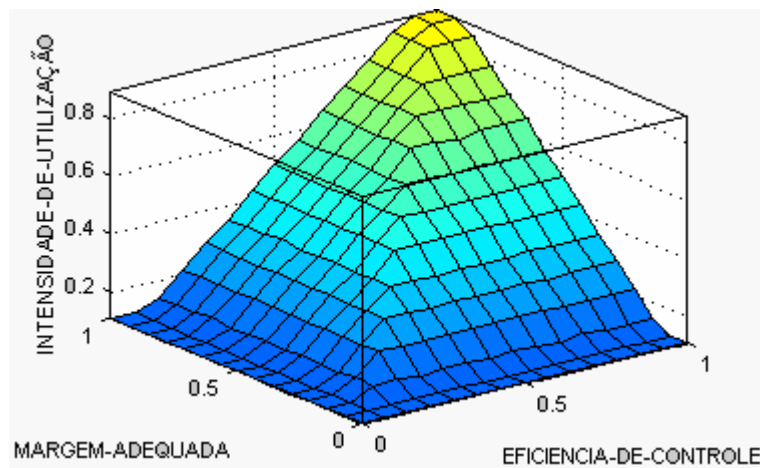


Figura AII.2 – superfície de controle para *max-produto* - CA (5 valores fuzzy).

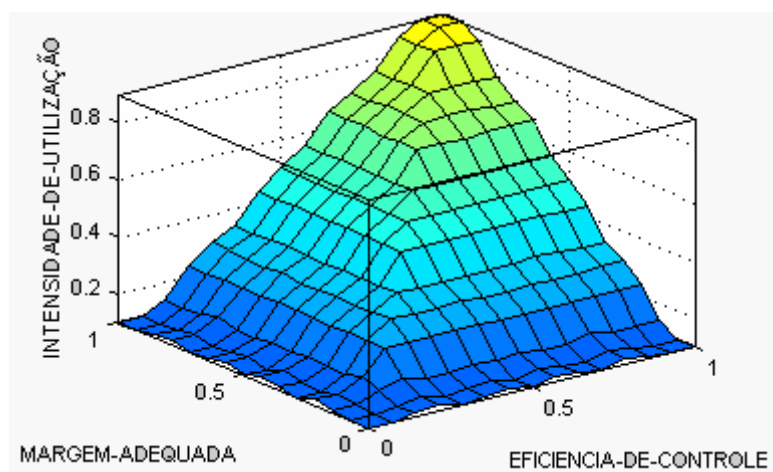


Figura AII.3 – superfície de controle para *max-min* - BA (5 valores fuzzy).

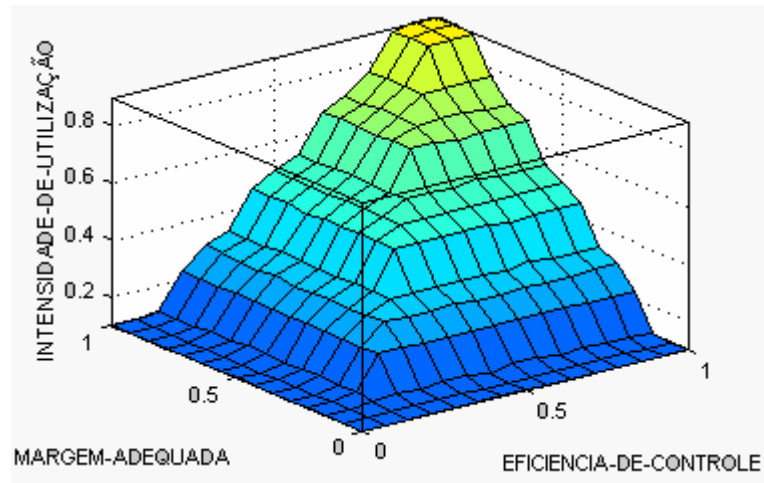


Figura AII.4 – superfície de controle para *max-product* - BA (5 valores fuzzy).

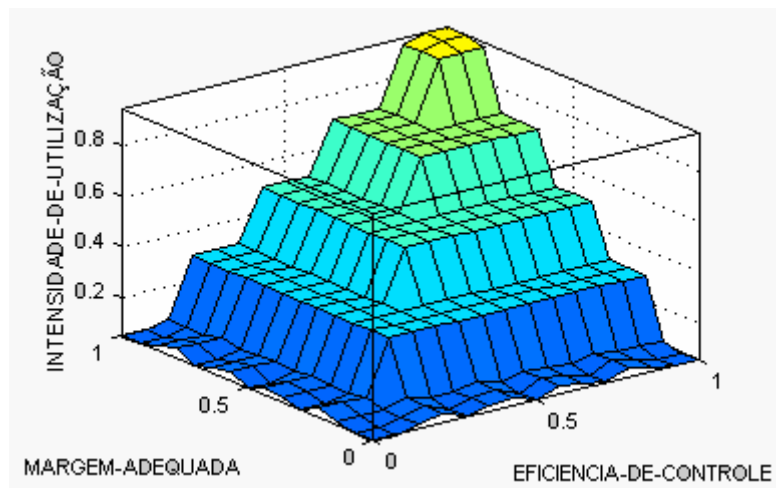


Figura AII.5 – superfície de controle para *max-min* - MM (5 valores fuzzy).

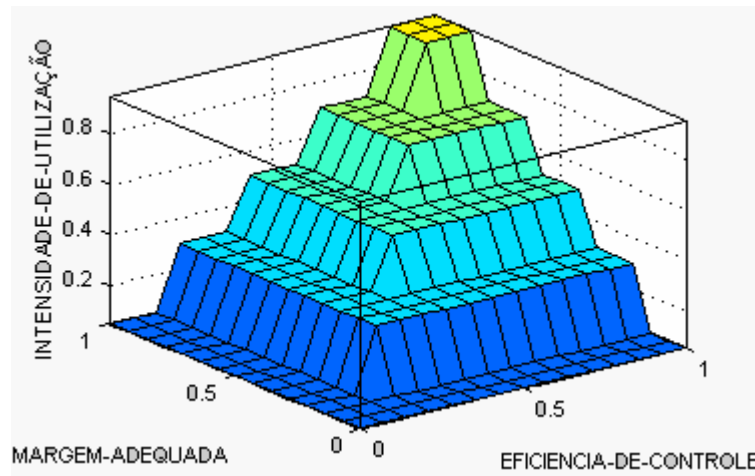


Figura AII.6 – superfície de controle para *max-producto* - MM (5 valores fuzzy).

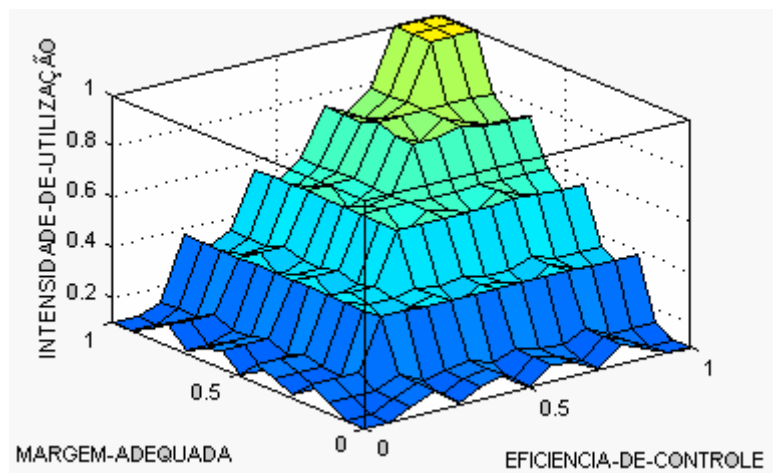


Figura AII.7 – superfície de controle para *max-min* - LM (5 valores fuzzy).

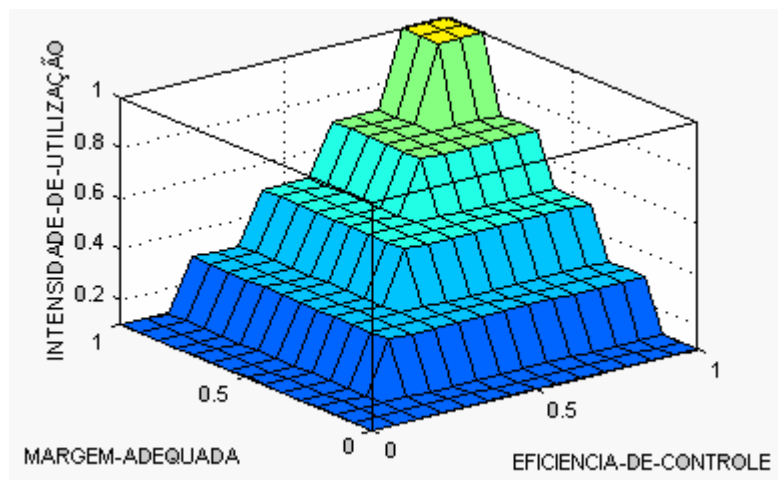


Figura AII.8 – superfície de controle para *max-produto* - LM (5 valores fuzzy).

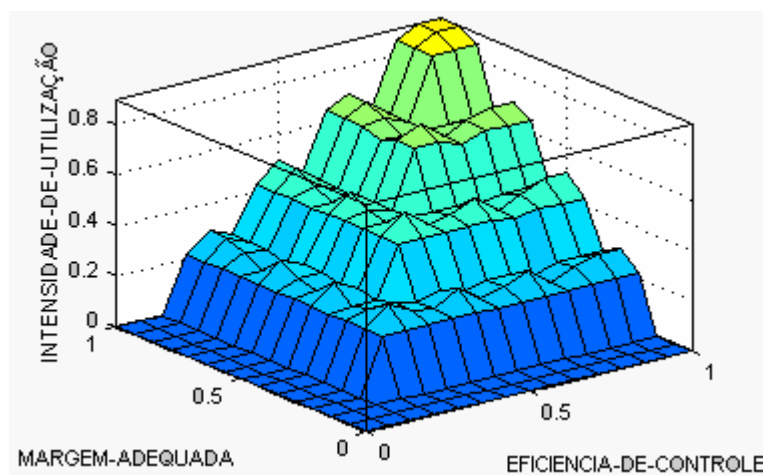


Figura AII.9 – superfície de controle para *max-min* - SM (5 valores fuzzy).

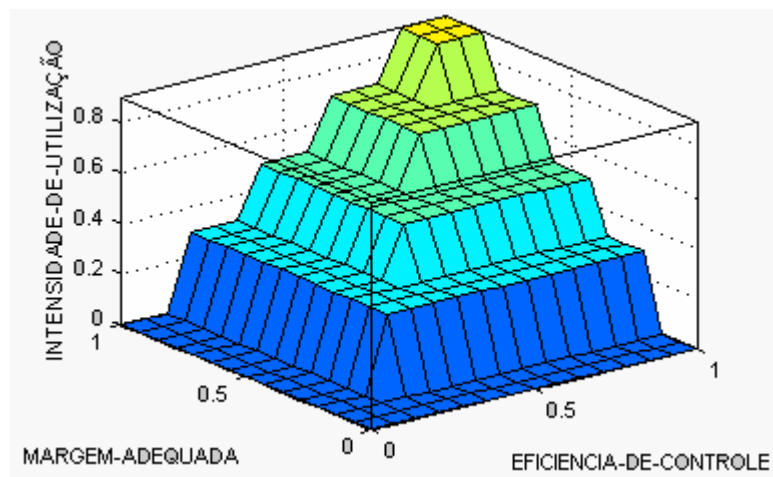


Figura AII.10 – superfície de controle para *max-produto* - SM (5 valores fuzzy).

b) Regras do tipo II

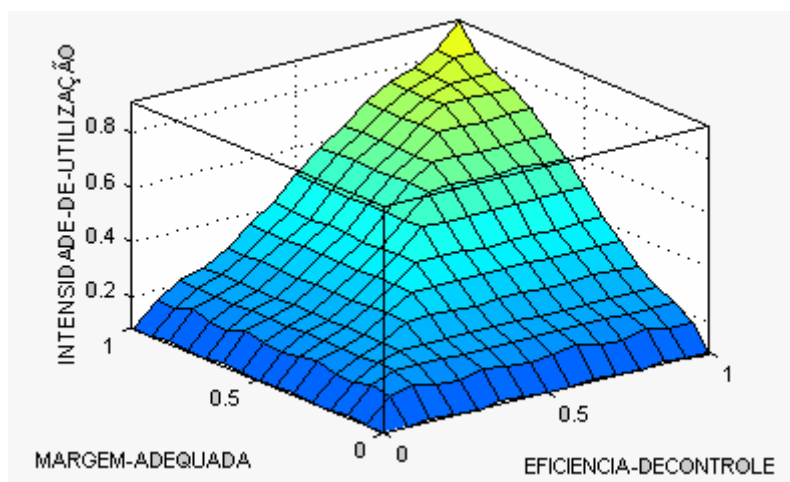


Figura AII.11 – superfície de controle para *max-min* - CA (5 valores fuzzy).

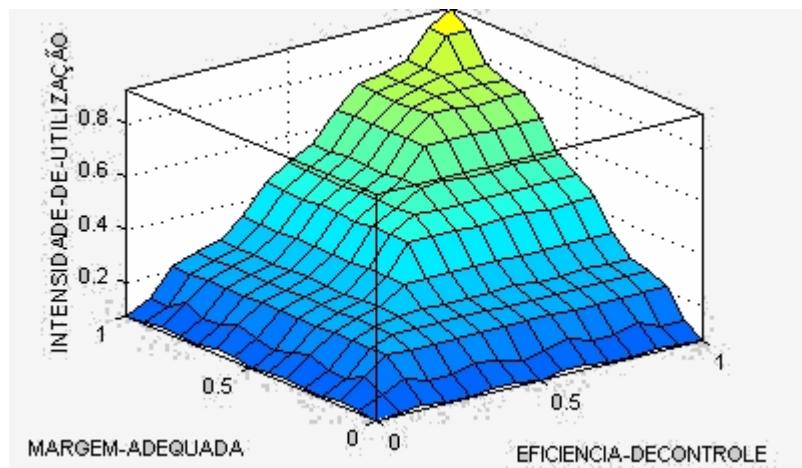


Figura AII.12 – superfície de controle para *max-min* - BA (5 valores fuzzy).

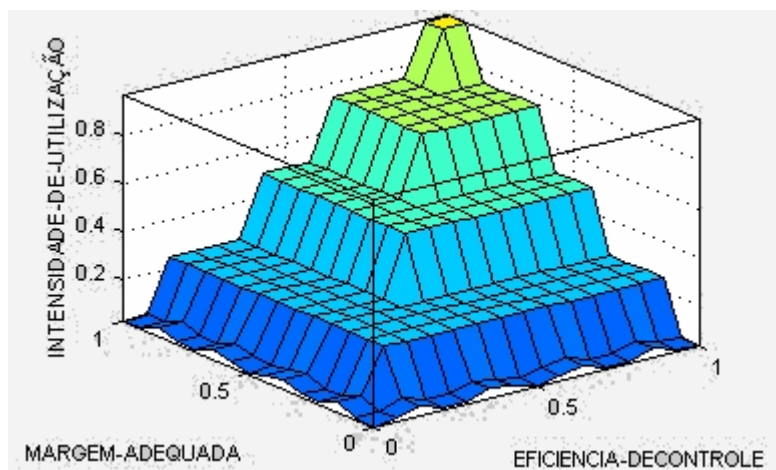


Figura AII.13 – superfície de controle para *max-min* - MM (5 valores fuzzy).

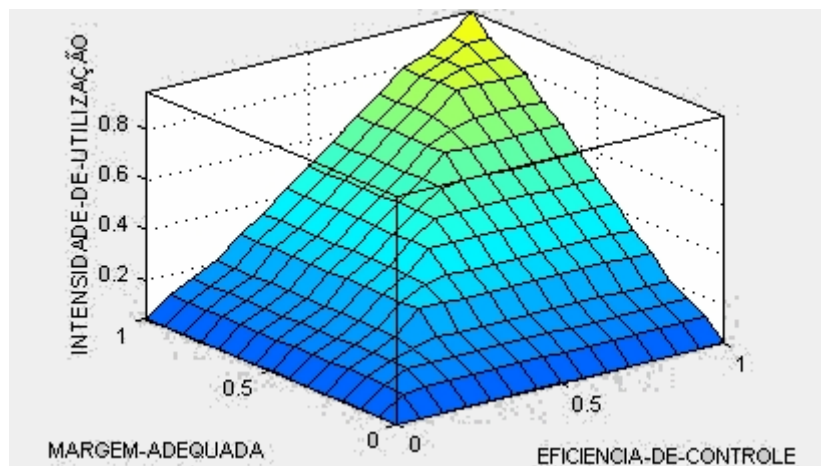


Figura AII.14 – superfície de controle para *max-produto* - CA (7 valores fuzzy).

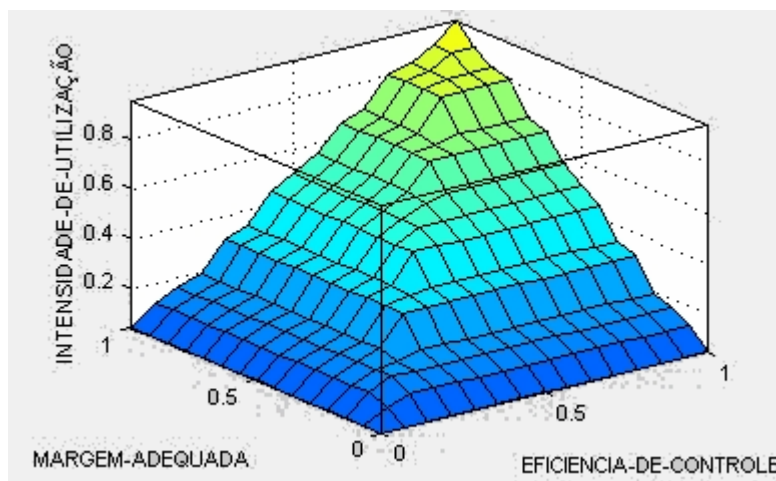


Figura AII.15 – superfície de controle para *max-produto* - BA (7 valores fuzzy).

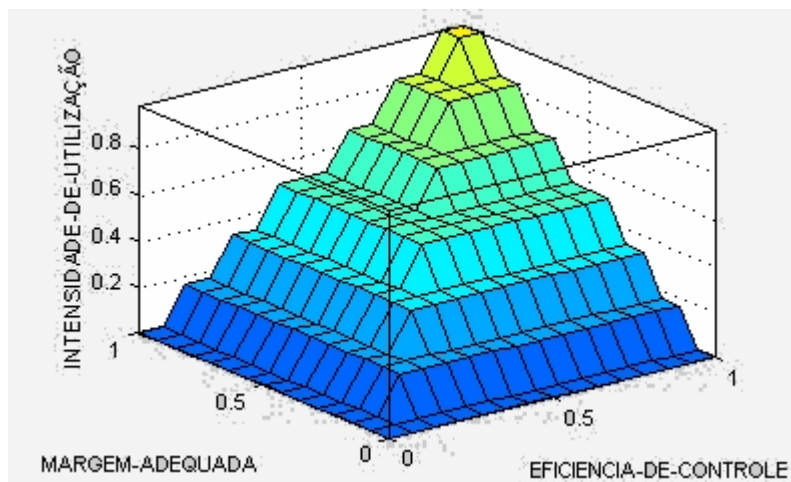


Figura AII.16 – superfície de controle para *max-product* - MM (7 valores fuzzy).

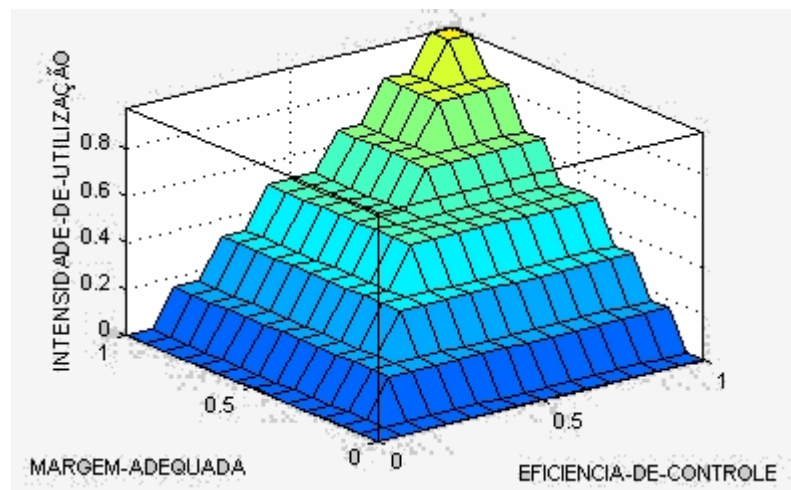


Figura AII.16 – superfície de controle para *max-product* - SM (7 valores fuzzy).

ANEXO III

INTERFACE GRÁFICA E CÓDIGO FONTE DO SOFTWARE EXPERIMENTAL PARA CONTROLE FUZZY (PLF)

As figuras abaixo mostram algumas das interfaces gráficas do software de controle “PLF” desenvolvido em parceria com aluna de iniciação científica do PPGE – PUC MINAS, Ana Paula de Mendonça Braga.



Figura AIII.1 – Janela de abertura do sistema de controle.



Figura AIII.2 – Janela principal do sistema de controle.

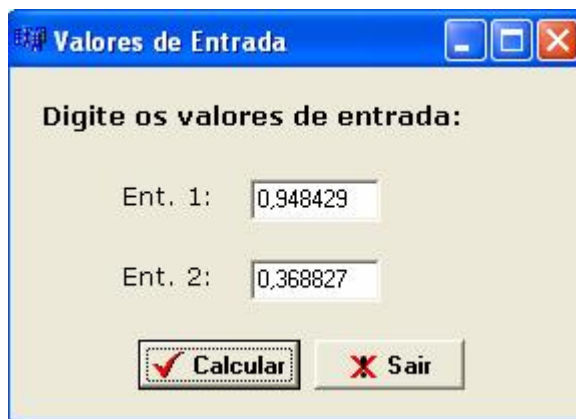


Figura AIII.3 – Janela de entrada de dados do sistema de controle.



Figura AIII.4 – Janela de saída de dados calculados do sistema de controle.



Figura AIII.1 – Listagem de regras do sistema de controle.

A seguir, temos o código fonte das principais funções do software experimental “PLF”, desenvolvido em Borland C++ Builder 6.0.

Devido ao número de linhas de código implementadas ser muito alto, foram colocados aqui apenas algumas das principais funções do software.

```
*Controlador Fuzzy */
/*bibliotecas*/
#include<stdio.h>
#include<iostream.h>
#include<conio.h>
#include<ctype.h>
#include<stdlib.h>
/*-----*/
#define NUM 21
#define P 2
#define ME 3
#define M 4
#define MA 5
#define G 6
```

```
#define qtd 21
#define linhas 101
#define colunas 6
#define nump 5
#define big 10

/*-----*/
//Funcoes de calculo - FUZZYFICACAO - TRAPEZOIDAL E TRIANGULAR
/*-----*/
/* Fuzzyficação - TRAPEIZODAL */
/*-----*/

float f_trap(float x, float a, float b, float c, float d, float y) {
int i;

if ((x>=a) && (x<=b))
    y=((x-a)/(b-a));
else
if ((x>=b) && (x<=c))
    y=1;
else
if ((x>=c) && (x<=d))
    y=((d-x)/(d-c));
else
if (x>=d)
    y=0;
return (y); }

/*-----*/
/* Fuzzyficação - TRIANGULAR */
/*-----*/

float f_tri(float x, float a, float b, float c, float y) {
int i;

if (x<=a)
    y=0;
else
if ((x>=a) && (x<=b))
    y=((x-a)/(b-a));
else
if ((x>=b) && (x<=c))
    y=((c-x)/(c-b));
else
if (x>c)
    y=0;

return (y);
}

/*=====*/
//Funcoes - INFERENCIA - MAXMIN
/*-----*/
/* Função Max (entre os mínimos passados) */
/*-----*/
```

```
void vetmax(float vetYout[25][21], float vetmaxx[25][21]) {
int i,j;
for (i=0;i<=20;i++)
for (j=0;j<=24;j++)
    if (vetYout[j][i]>maxx[i])
        {
            maxx[i]=vetYout[j][i];
            auxmaxvet[i]=vetmaxx[j][i];
        }
}
/*-----*/
float maxmvet(float vetmin[]) {
float max=0.0;
int i=0;

for (i=0; i< NUM; i++)
    if (vetmin[i]>=max)
        {
            max=vetmin[i];
        }

    return (max);
}

/*-----*/
float maxmvet1(float vetmin[], int &pos) {
float max=0.0;
int i=0;

for (i=0; i< NUM; i++)
    if (vetmin[i]>=max)
        {
            max=vetmin[i];
            pos=i;
        }

    return (max);
}
/*-----*/
float maxvet(float vetmin[], float valor){
float max;
int i;
for (i = 0; i<qtd; i++) {
    if (vetmin[i]>=valor)
        max=vetmin[i];
    else
        max = valor;
}
return (max);
}
```

```
/*-----*/
/* Função Maxm (Mínimo entre os maximos passados) */
/*-----*/

float maxm(float vmin1, float vmin2)
{
float vmax_f=0.0;

        if (vmin1>=vmin2)
        {
                vmax_f = vmin1;
        }
        else
                vmax_f = vmin2;

        return (vmax_f);
}
/*-----*/
/* Função Minm (Mínimo entre os maximos passados) */
/*-----*/

float minm(float vmax1, float vmax2)
{
        float vmin_f=0.0;

        if (vmax1<=vmax2)
        {
                vmin_f = vmax1;
        }
        else
                vmin_f = vmax2;

        return (vmin_f);
}
/*-----*/
/* Função Minvet (Mínimo entre vetor e valor x) */
/*-----*/

void minvet(float vetmin[],float valor)
{
int i;

        for (i=0; i<NUM; i++)
                if (vetmin[i]<=valor) {
                        vmin_f[i] = vetmin[i];
                        if ((vetmin[i]==valor) &&(vetmin[i]>=ui[i]))
                                auxminvet[i]=auxmin[i];
                        else
                                auxminvet[i]=auxmin[i];
                }
        else
                { vmin_f[i] = valor;
                auxminvet[i]=auxmin[i];
        }
}
```

```
    }
/*-----*/
float minmvet(float vetmin[]) {
float min=big;
for (int i=0; i<5; i++)
    if ((vetmin[i]<min) && (vetmin[i]!=big))
        {
            min=vetmin[i];
        }
    return (min);
}
/*-----*/

/*-----*/
//Funcoes - INFERENCIA - MAXPROD
/*-----*/
/* Função maxprod - inferencia maxprod */
/*-----*/
float maxprod(float vetE[], float valor)
{
    float vmax=0.0;
    float vetprod[NUM]={0.0};

    for (int i=0; i<qtd; i++)
        {
            vetprod[i]=(vetE[i]* valor);
        }

    vmax=maxmvet(vetprod);

    return (vmax);
}
/*-----*/
float maxprod_1(float vetE[],float vetorpert[])
{
    float respx[]={big,big,big,big,big};
    float minimo;
    float mult1[]={1,1,1,1,1};
    for (int i=0;i<nump;i++)
        {
            if (vetorpert[i]!=big)
                respx[i]=maxprod(vetE,vetorpert[i]);
        }

    for (int s=0;s<nump;s++)
        {

            if (respx[s]!=big)
                {
                    mult1[s]=respx[s];
                }
        }
}
```

```
    }
    mult=1;
    for (int s=0;s<nump;s++)
    {
        mult=(mult*(mult1[s]));
    }
    return (mult);
}
/*-----*/
/* Função maxmin_2 - inferencia maxmin */
/*-----*/
float maxmin_2(float vetE[], float valor, float &x_in)
{
    float vmax=0.0;
    float vetminimo[NUM]={0.0};

    for (int i = 0; i<qtd; i++)
    {
        {
            if (vetE[i]<=valor)
            {
                vetminimo[i]=vetE[i];
                if ((vetE[i]==valor) && (ui[i]<x_in))
                    auxmin[i]=x_in;
                else
                    auxmin[i]=ui[i];
            }
            else
            {
                { vetminimo[i]=valor;
                auxmin[i]=x_in;
                }
            }
        }

        vmax=maxmvect(vetminimo);

        return (vmax);
    }
}
/*-----*/
float maxmin_1(float vetE[],float vetorpert[], float x_in)
{
    float respx[]={big,big,big,big,big};
    float minimo;
    for (int i=0;i<nump;i++)
    {
        {
            if (vetorpert[i]!=big)
                respx[i]=maxmin_2(vetE,vetorpert[i],x_in);
        }
        minimo= minmvect(respx);
    }
    return(minimo);
}
```

```
/*-----*/

//Funções de Calculo - DEFUZZIFICAÇÃO - CA, CM, MM
/*-----*/
/* Defuzzificacao - CA */
/*-----*/
float coa_def(float vetmout[],float auxmin[]) {

float coa_result=0;
float coa_denomi=0,result=0;
for (int i=0; i<NUM; i++) {
    coa_result = ((auxmin[i])*(vetmout[i]))+ coa_result;
    coa_denomi = vetmout[i]+coa_denomi;
}

if (coa_denomi > 0)
{
    result = (coa_result)/(coa_denomi);
}
return (result); }

/*-----*/
/* Defuzzificacao - MM */
/*-----*/
float mom_def(float vetmom[],float vetmomaux[],int count) {
int i;
float mom_result=0;
float result=0;
for (i=0; i<=count; i++) {
    mom_result = (vetmomaux[i]+mom_result);
}

result = (mom_result)/count;

return (result);
}

float cos_def(float vetCOS[], float vetCOS2[])
{
float valFN=0,valFD=0,valFCos=0;
for (int j=0; j<=24; j++)
{
    valFN=valFN+vetCOS[j];
    valFD=valFD+vetCOS2[j];
}
valFCos=(valFN/valFD);

return(valFCos);
}
```

```
float com_def(float vetCOM[], float vetCOM2[])
{
float valCOMD=0, valCOMN=0, valFCom=0;
for (int j=0; j<=24; j++)
{
    valCOMN=valCOMN+vetCOM[j];
    valCOMD=valCOMD+vetCOM2[j];
}
valFCom=(valCOMN/valCOMD);

return (valFCom);
}
```

ANEXO IV

REGRAS DA BASE DE CONHECIMENTO

Para cinco valores fuzzy (P, ME, M, MA e G) para *eficiência de controle* e *margem adequada* e 5 valores fuzzy (GN, MN, Z, MP e GP) para *incremento de perdas*, o conjunto das regras concretas são refletidas por matriz tridimensional com 125 regras, esta matriz pode ser apresentada como a seguinte seqüência:

1	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
2	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
3	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
4	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
5	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
6	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	ME	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
7	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	ME	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
8	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	ME	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
9	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	ME	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
10	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	ME	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
11	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
12	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
13	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
14	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
15	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO
16	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	P	E	<i>margem adequada</i>	é	MA	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	P	SENÃO

Anexo IV - Regras da Base de Conhecimento

113	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	M	SENÃO
114	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	ME	SENÃO
115	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	M	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	ME	SENÃO
116	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	MA	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MA	SENÃO
117	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	MA	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MA	SENÃO
118	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	MA	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MA	SENÃO
119	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	MA	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	M	SENÃO
120	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	MA	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	M	SENÃO
121	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	G	SENÃO
122	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	G	SENÃO
123	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	G	SENÃO
124	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	ME	SENÃO
125	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	G	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	ME	SENÃO

Para sete valores fuzzy (MP, P, ME, M, MA, G, MG) para *eficiência de controle* e *margem adequada* e sete valores fuzzy (EN, GN, MN, Z, MP, GP, EP) para *incremento de perdas*, o conjunto das regras concretas são refletidas por matriz tridimensional com 125 regras, esta matriz pode ser apresentada como a seguinte seqüência:

1	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MP	E	<i>margem adequada</i>	é	MP	E	<i>incremento de perdas</i>	é	EN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MP	SENÃO
2	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MP	E	<i>margem adequada</i>	é	MP	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MP	SENÃO
3	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MP	E	<i>margem adequada</i>	é	MP	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MP	SENÃO
4	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MP	E	<i>margem adequada</i>	é	MP	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MP	SENÃO
5	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MP	E	<i>margem adequada</i>	é	MP	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MP	SENÃO
6	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MP	E	<i>margem adequada</i>	é	MP	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MP	SENÃO
7	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MP	E	<i>margem adequada</i>	é	MP	E	<i>incremento de perdas</i>	é	EP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MP	SENÃO
8	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MP	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	EN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MP	SENÃO
9	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MP	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MP	SENÃO
10	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MP	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MP	SENÃO
11	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MP	E	<i>margem adequada</i>	é	P	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MP	SENÃO

Anexo IV - Regras da Base de Conhecimento

332	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MG	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	G	SENÃO
333	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MG	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	G	SENÃO
334	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MG	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MA	SENÃO
335	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MG	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	M	SENÃO
336	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MG	E	<i>margem adequada</i>	é	G	E	<i>incremento de perdas</i>	é	EP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	ME	SENÃO
337	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MG	E	<i>margem adequada</i>	é	MG	E	<i>incremento de perdas</i>	é	EN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MG	SENÃO
338	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MG	E	<i>margem adequada</i>	é	MG	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MG	SENÃO
339	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MG	E	<i>margem adequada</i>	é	MG	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MN	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MG	SENÃO
340	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MG	E	<i>margem adequada</i>	é	MG	E	<i>incremento de perdas</i>	é	Z	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MG	SENÃO
341	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MG	E	<i>margem adequada</i>	é	MG	E	<i>incremento de perdas</i>	é	MP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	G	SENÃO
342	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MG	E	<i>margem adequada</i>	é	MG	E	<i>incremento de perdas</i>	é	GP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	MA	SENÃO
343	SE	<i>eficiência de controle</i>	é	MG	E	<i>margem adequada</i>	é	MG	E	<i>incremento de perdas</i>	é	EP	ENTÃO	<i>intensidade de utilização</i>	é	M	

ANEXO V

EXEMPLO DE CÁLCULO DA SAÍDA DO SISTEMA DE CONTROLE

Mostraremos a seguir um exemplo para cálculo da saída do sistema de controle, o qual considera os dados das variáveis de controle j contidos na *Tabela 2.2* e os resultados de defuzzyficação utilizando o método CA, contidos na *Tabela 4.10* (para regras do tipo I) e *Tabela 4.39* (para regras do tipo II), será mostrada a utilização das correlações (4.5) e (4.7), e conseqüentemente a forma de obtenção da solução final para o problema em estudo.

a) Para regras do tipo I, temos:

$$u_1^* = 0,373, \quad u_2^* = 0,250, \quad u_3^* = 0,254, \quad u_4^* = 0,266, \quad u_5^* = 0,939.$$

Para $S_{964,1}^V > 0$, $S_{964,2}^V > 0$, $S_{964,3}^V > 0$, $S_{964,5}^V > 0$, utilizaremos a equação (4.5) e $S_{964,4}^V < 0$ utilizaremos a equação (4.7). Particularmente, para Δx_1 temos:

$$\Delta x_1 = x'_1 - 0,98000 = \frac{1}{0,272959} 0,0291 \frac{0,373}{2,082},$$

$$\Delta x_1 = x'_1 - 0,98000 = 0,0191 \rightarrow x'_1 = 0,9991.$$

Calculando para as demais variáveis de controle, temos: $x'_1 = 0,9991$, $x'_2 = 1,0008$, $x'_3 = 0,9994$, $x'_4 = 1,0801$ e $x'_5 = 1,0156$.

Para todas as variáveis (x'_1, x'_2, x'_3, x'_4 e x'_5) foram observadas as correlações (4.9) e (4.10) de acordo com cada caso, portanto, as mesmas podem ser consideradas como saída para o sistema de controle, ou seja, como solução baseada nas regras do tipo (I).

b) Para regras do tipo II, temos:

$$u_1^* = 0,370, \quad u_2^* = 0,249, \quad u_3^* = 0,249, \quad u_4^* = 0,100, \quad u_5^* = 0,907.$$

Cálculo de x'_1 :

$$\Delta x_1 = x'_1 - 0,98000 = \frac{1}{0,272959} 0,0291 \frac{0,370}{1,875},$$

$$\Delta x_1 = x'_1 - 0,98000 = 0,021038 \rightarrow x'_1 = 1,0014.$$

Calculando para as demais variáveis de controle, temos: $x'_1 = 1,0014$, $x'_2 = 1,0029$, $x'_3 = 1,0012$, $x'_4 = 1,1508$ e $x'_5 = 1,0189$.

Da mesma maneira, para todas as variáveis (x'_1, x'_2, x'_3, x'_4 e x'_5) foram observadas as correlações (4.9) e (4.10) de acordo com cada caso, portanto, as mesmas podem ser consideradas como saída para o sistema de controle, ou seja, como solução baseada nas regras do tipo (II).

Para efeito comparativo a *Tabela AIV.1*, inclui os valores das variáveis de controle para os dois casos:

Tabela AIV.1 – Soluções baseadas nas regras do tipo I e do tipo II.

Tipo de regra	x'_1	x'_2	x'_3	x'_4	x'_5
I	0,9991	1,0008	0,9994	1,0801	1,0156
II	1,0014	1,0029	1,0012	1,1508	1,0189

É natural que as soluções apresentadas na *Tabela AIV.1* não estejam prontas para a utilização prática. As posições discretas dos taps dos transformadores TX (onde X pode ser 1,2,3...) não foram definidas (a solução para essa questão pode ser baseada na utilização de métodos de otimização discreta, discutidos em [85],[90], mas está fora do escopo do presente trabalho). No entanto, os resultados da *Tabela AIV.1* demonstram que a utilização das regras do tipo (II) possibilita a minimização de perdas dentro da etapa do controle corretivo.

ANEXO VI

RESULTADOS DE EXPERIMENTOS REALIZADOS

Para todos casos em que foi avaliada a função de pertinência sigmoidal, os resultados de desvios foram muito altos, portanto estes casos não foram considerados para fins comparativos, e seus valores são mostrados abaixo:

a) Regras do tipo I:

- Na *Tabela AVI.1*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação para 3 valores fuzzy, encontrados na *Tabela 4.9*. Nesse caso temos função de pertinência trapezoidal para valores iniciais e finais e sigmoidais para valores intermediários, 50 % de sobreposição das funções de pertinências e 3 valores fuzzy para ambas as variáveis de entradas e saída. Inferência fuzzy *max-min* e *max-produto*.
- Na *Tabela AVI.2*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação para 5 valores fuzzy, encontrados na *Tabela 4.17*, mantendo as mesmas condições anteriores.
- Na *Tabela AVI.3* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação para 7 valores fuzzy, encontrados na *Tabela 4.24*, mantendo as mesmas condições anteriores.
- Na *Tabela AVI.4* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação para 9 valores fuzzy, encontrados na *Tabela 4.31*, mantendo as mesmas condições anteriores.

b) Regras do tipo I:

- Na *Tabela AVI.5*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação para 3 valores fuzzy, encontrados na *Tabela 4.38*. Nesse caso temos função de pertinência trapezoidal para valores iniciais e finais e sigmoidais para valores intermediários, 50 % de sobreposição das funções de pertinências e 3 valores fuzzy para as três variáveis de entradas e saída. Inferência fuzzy *max-min* e *max-produto*.
- Na *Tabela AVI.6*, temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação para 5 valores fuzzy, encontrados na *Tabela 4.45*, mantendo as mesmas condições anteriores.
- Na *Tabela AVI.7* temos os resultados de “distância Euclidiana” entre os valores “padrões” e os resultados de defuzzyficação para 7 valores fuzzy, encontrados na *Tabela 4.52*, mantendo as mesmas condições anteriores.

a) Tipo I:

Tabela AVI.1 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (trap-sigm-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,191	0,211	0,316	0,631	0,001	0,206	0,231	0,631	0,631	0,631
2	0,154	0,064	0,121	0,006	0,236	0,160	0,064	0,161	0,086	0,236
3	0,158	0,069	0,121	0,001	0,241	0,165	0,079	0,166	0,091	0,241
4	0,171	0,111	0,129	0,001	0,259	0,106	0,001	0,184	0,109	0,259
5	0,360	0,350	0,075	0,000	0,150	0,360	0,350	0,075	0,000	0,150
$d^m(A,B)$	0,207	0,161	0,152	0,128	0,177	0,199	0,145	0,243	0,183	0,303

Tabela AVI.2 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-sigm-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,232	0,231	0,316	0,631	0,001	0,232	0,231	0,631	0,631	0,631
2	0,319	0,324	0,384	0,764	0,004	0,328	0,334	0,764	0,764	0,764
3	0,320	0,329	0,384	0,759	0,009	0,328	0,339	0,759	0,759	0,759
4	0,317	0,321	0,371	0,741	0,001	0,322	0,331	0,741	0,741	0,741
5	0,399	0,400	0,050	0,000	0,100	0,399	0,400	0,000	0,000	0,000
$d^m(A,B)$	0,317	0,321	0,301	0,579	0,023	0,322	0,327	0,579	0,579	0,579

Tabela AVI.3 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (trap-sigm-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
j	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,174	0,171	0,316	0,631	0,001	0,174	0,171	0,631	0,631	0,631
2	0,307	0,304	0,384	0,764	0,004	0,307	0,304	0,764	0,764	0,764
3	0,302	0,299	0,384	0,759	0,009	0,302	0,299	0,759	0,759	0,759
4	0,284	0,281	0,371	0,741	0,001	0,284	0,281	0,741	0,741	0,741
5	0,427	0,460	0,250	0,000	0,020	0,427	0,460	0,010	0,000	0,020
$d^m(A,B)$	0,299	0,303	0,341	0,579	0,007	0,299	0,303	0,581	0,579	0,583

Tabela AVI.4 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 9 valores fuzzy e função de pertinência (trap-sigm-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,165	0,161	0,316	0,631	0,001	0,165	0,161	0,581	0,631	0,531
2	0,297	0,294	0,384	0,764	0,004	0,298	0,294	0,714	0,764	0,664
3	0,292	0,292	0,384	0,759	0,009	0,293	0,289	0,709	0,759	0,659
4	0,275	0,271	0,371	0,741	0,001	0,275	0,271	0,691	0,741	0,641
5	0,466	0,470	0,250	0,000	0,100	0,466	0,470	0,050	0,000	0,100
$d^m(A,B)$	0,299	0,298	0,341	0,579	0,023	0,299	0,297	0,549	0,579	0,519

b) Tipo II:

Tabela AVI.5 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 3 valores fuzzy e função de pertinência (trap-sigm-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,175	0,191	0,291	0,631	0,049	0,214	0,241	0,631	0,631	0,631
2	0,116	0,024	0,121	0,006	0,236	0,118	0,014	0,141	0,056	0,226
3	0,123	0,029	0,121	0,001	0,241	0,127	0,019	0,146	0,061	0,231
4	0,313	0,228	0,038	0,168	0,092	0,228	0,128	0,003	0,088	0,082
5	0,316	0,313	0,263	0,057	0,583	0,297	0,293	0,057	0,057	0,057
$d^m(A,B)$	0,209	0,157	0,167	0,173	0,240	0,197	0,139	0,196	0,179	0,245

Tabela AVI.6 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 5 valores fuzzy e função de pertinência (trap-sigm-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,193	0,191	0,266	0,631	0,099	0,194	0,201	0,631	0,631	0,631
2	0,325	0,324	0,384	0,764	0,004	0,327	0,334	0,764	0,764	0,764
3	0,320	0,319	0,384	0,759	0,009	0,322	0,329	0,759	0,759	0,759
4	0,417	0,418	0,475	0,908	0,092	0,419	0,428	0,908	0,908	0,908
5	0,380	0,383	0,283	0,057	0,623	0,380	0,373	0,022	0,057	0,013
$d^m(A,B)$	0,327	0,327	0,358	0,624	0,165	0,328	0,333	0,617	0,624	0,615

Tabela AVI.7 – Distância Euclidiana entre os valores padrões e os resultados obtidos nos experimentos para 7 valores fuzzy e função de pertinência (trap-sigm-trap).

Distâncias Euclidianas										
	max-min					max-produto				
J	CA	BA	MM	LM	SM	CA	BA	MM	LM	SM
1	0,174	0,171	0,286	0,631	0,059	0,174	0,171	0,511	0,631	0,391
2	0,307	0,304	0,384	0,764	0,004	0,307	0,304	0,644	0,764	0,764
3	0,302	0,299	0,384	0,759	0,009	0,302	0,299	0,639	0,759	0,519
4	0,417	0,418	0,500	0,908	0,092	0,417	0,418	0,645	0,908	0,092
5	0,400	0,403	0,263	0,057	0,583	0,400	0,403	0,063	0,057	0,183
$d^m(A, B)$	0,320	0,319	0,363	0,624	0,149	0,320	0,319	0,500	0,624	0,390

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. W.L.F. Junior, **Um Estudo Sobre Coordenação e Ajuste de Transformadores Com Mudança de Tap Sob Carga e de Bancos de Capacitores Para Suporte das Ações de Controle Coordenado de Tensão e Potência Reativa: Dissertação de Mestrado**. Porto Alegre: PUC-RS, 2002.
2. Eletrobrás, **Operação de Sistemas de Potência – Controle de Tensão em Regime Permanente**. Rio de Janeiro: LKM Technical Services Ltd, 1990.
3. T.J.E. Miller, **Reactive Power Control in Electric Systems**. New York: John Wiley & Sons, 1982.
4. V.A. Venikov, V.I. Idelchik e M.S. Liseev, **Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência**. Moscou: Energoatomizdat, 1985 (em russo–traduzido pelo professor orientador).
5. S. Narita and M.S.A.A. Hammam, A computational algorithm for real-time control of system voltage and reactive power, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. 90, No. 6, 1971, pp. 2495-2508.
6. Brasil: 2001. Resolução No. 456 da ANEEL, de 29 de novembro de 2000. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil de 30/11/00**, Brasília, Seção 1, pp. 35.
7. Brasil: 2001. Resolução No. 505 da ANEEL, de 26 de novembro de 2001. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, Vol. 138, No. 226, pp. 16.
8. Brasil: 2001. Resolução No. 676 da ANEEL, de 16 de dezembro de 2003. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil de 22/12/03**, Brasília, Seção 1, pp. 86
9. N.S. Markushevich, **Sistema Automatizado de Despacho de Carga**. Moscou: Energoatomizdat, 1986 (em russo–traduzido pelo professor orientador).
10. K.H. Abdul-Rahman, S.M. Shahidehpour, and M. Daneshdoost, AI approach to optimal var control with fuzzy reactive loads, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 10, No. 1, 1995, pp. 88-97.
11. M.F.D. Junges, **Lógica Fuzzy em Controle de Tensão e Potência Reativa em Sistemas de Potência: Dissertação de Mestrado**. Belo Horizonte: PUC-MG, 2000.
12. VAR management – problem recognition and control. IEEE Committe report, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. 103, No. 8, 1984, pp. 2108-2116.
13. W.F. Tinney, J.M. Bright, K.M. Demaree and B.A. Hugles, Some deficiencies in optimal power flow, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 3, No. 2, 1988, pp. 676-683.
14. L. Yutian and Z. Sen, Research on assisting decision-making of reactive power/voltage control by expert system technology, in **Proceedings of the Third Symposium on Expert Systems Applications to Power Systems**, Tokyo-Kobe, 1991, pp. 40-43.

15. T. Niimura, Y. Nakanishi, K. Yasuda, and R. Yokoyama, Multi-attribute voltage-reactive power control based on approximate reasoning, in **Proceedings of the Third Symposium on Expert System Applications to Power Systems**, Tokyo-Kobe, 1991, pp. 462-469.
16. A.G. Expósito, J.L.M. Ramos, J.L.R. Macias, and Y.C. Salinas, Sensitivity-based reactive power control for voltage profile improvement, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 8, No. 3, 1993, pp. 937-945.
17. F.A.B. Lemos, J.S. Freitas, L.C. Werberich, M.A. Rosa, Avaliação das potencialidades de aplicação de um controle secundário coordenado de tensão em sistemas de sub-transmissão e distribuição de energia elétrica, em **Anais do XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Campinas, 2001, http://www.xviisnptee.com.br/acervo_tecnico/memoria/xvi/04_Grupo_IV_Gat/gat-007.pdf
18. W.L. Feijó Jr., F.A.B. Lemos, M.A. Rosa, Benefícios da utilização de esquemas coordenados de tensão/potência reativa em sistemas de sub-transmissão e distribuição de energia elétrica em **Anais do XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica**. Salvador, 2002, <http://www.coelba.com.br/send/ trabalhos/1102.pdf>.
19. M.I. Murta, M.S. Lameiras, M.H.M. Vale, M.P.B.J. Jr, F.G.C. Coelho, CAT - Controle Automático de Tensão – Pacote Computacional para Controle Sistêmico de Tensão no Sistema de Supervisão e Controle Distribuído – Cemig, em **Anais do XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Paraná, 1999, http://www.xviisnptee.com.br/acervo_tecnico/memoria/xv/grupoix/gop16.pdf.
20. M. Ilic, F. Galiana, and L. Fink, **Power Systems Restructuring: Engineering and Economics**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.
21. X.V. Filho, B.G. Gorenstin, R.S. Sacramento, C.G. Melo e M.E.P. Maceira, Comercialização de energia no mercado spot. Riscos e vantagens em um sistema hidrotérmico – mecanismos de proteção, **Eletroevolução**, No. 21, 2000, pp. 43-48.
22. R.L. Abreu e L.C.T. Vilela, Serviços ancilares – uma proposta de classificação e precificação para o setor elétrico brasileiro, **Anais do XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Campinas, 2001, http://www.xviisnptee.com.br/acervo_tecnico/memoria/xvi/04_Grupo_IV_Gat/gat-016.pdf.
23. R.J. Kaye, M.A.B. Zammit, and D.J. Hill, Co-ordinated spot and ancillary service market to optimise power systems security, in **Proceedings of the International Symposium on Bulk Power Systems Dynamics and Control IV: Restructuring**. Santorini, 1998, pp. 539-544.
24. R.L.J. Carnevalli, B.M. Mendonça Neta, R.C. Brito, J.L.T. Morra, A.V. Garcia, P.Ya. Ekel, M.F.D. Junges, D.L. Guidone, and R.M. Palhares, Energy Management System and Fuzzy Control of Voltage and Reactive Power in Subtransmission System, **WSEAS Transactions on Circuit and System**, Vol. 2, No. 3, 2004, pp. 306-311.
25. J.L.T. Morra, R.L.J. Carnevalli, B.M.Mendonça Neta, S.T.M. Costa, A.V.Garcia e P.Ia. Ekel, xOMNI-Sistema SCADA/EMS, **Revista CIER**, Ano IX, No. 41, 2002, pp. 42-48.
26. H.J. Zimmermann, **Fuzzy Set Theory and Its Applications**. Boston-Dordrecht-London:Kluwer Academic Publishers, 1990.

27. I.S. Shaw e M.G. Simoes, **Controle e Modelagem Fuzzy**. SãoPaulo: Edgard Blucher, 1999.
28. J. Peschon, D.S. Piercy, W.F. Tinney, O.J. Tveit and M. Guenod, Optimum control of reactive power flow, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. 87, No. 1, 1968, pp. 40-48.
29. I. Hano, Y. Tamura, S. Narita and K. Matsumoto, Real time control of system voltage and reactive power, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. 88, No. 10, 1969, pp. 1344-1359.
30. L.A. Krumm, **Métodos de Otimização no Controle de Sistemas Elétricos de Potência**. Novossibirsk: Nauka, 1981 (em russo-traduzido pelo professor orientador).
31. O. Alsaç, J. Bright, M. Prais and B. Stott, Further development in LP-based optimal flow, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 5, No. 3, 1990, pp. 697-711.
32. A.J. Germond and D. Niebur, Survey of knowledge based systems in power systems: Europe, **Proceedings of the IEEE**, Vol. 80, No. 5, 1992, pp. 732-744.
33. R. Forsyth, ed., **Expert Systems: Principles and Case Studies**. London-New York: Champan and Hale, 1987.
34. A.V. Prakhovnik, P.I. Ekel e F.F. Bondarenko, **Modelos e Métodos de Otimização e Controle dos Modos de Operação de Sistemas de Fornecimento de Energia Elétrica**. Kiev: ISDO, 1994 (em ucraniano-traduzido pelo professor orientador).
35. C.C. Liu and K. Tomsovic, An expert system assisting decision making on reactive power/voltage control, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 1, No. 3, 1986, pp.195-201.
36. Z.Z. Zhang, G.S. Hope, and O.P Malik, Expert systems in electric power systems - a bibliographical survey, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 4, No. 4, 1989, pp. 1355-1361.
37. M. Huneault, C. Rosu, R. Manoliu, and F.D. Galiana, A study of knowledge engineering tools in power engineering applications, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 9, No. 4, 1994, pp. 1825-1831.
38. S.J. Cheng, O.P. Malik, and G.S. Hope, An expert system for voltage and reactive power control, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 3, No. 4, 1988, pp. 1449-1455.
39. W.R. Wagner, A. Keyhani, S. Hão, and T.C. Wong, A rule-based approach to decentralized voltage control, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 5, No. 2, 1990, pp. 643-651.
40. T.F. Godart and H.B. Püttgen, A reactive path concept applied within a voltage control expert system, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 6, No. 2, 1991, pp. 787-793.
41. R. Yokoyama, T. Niimura, and Y. Nakanishi, A coordinated control of voltage and reactive power by heuristic modeling and approximate reasoning, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 8, No. 2, 1993, pp. 636-645.

42. J.A. Momoh, X.W. Ma, and K. Tomsovic, Overview and literature survey of fuzzy set theory in power systems, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 10, No. 3, 1995, pp. 1676-1690.
43. P. Ekel and V. Popov, Fuzzy set theory and problems of the design and control of power systems and subsystems, in **Proceedings of the 4-th IEEE Conference on Control Applications**, Albany, 1995, pp. 46-51.
44. T. Takagi and M. Sugeno, Fuzzy identification and its applications to modeling and control, **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, Vol. 15, No. 1, 1985, pp. 116-132.
45. W. Pedrycz and F. Gomide, **An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design**. Cambridge: MIT Press, 1998.
46. R.M. Tong, Synthesis of fuzzy models for industrial processes - some recent results, **International Journal on General Systems**, Vol. 4, No. 2, 1978, pp. 143-162.
47. P.I. Ekel, V.A. Popov e V.V. Tkachenko, Inferência fuzzy em problemas de operação e desenvolvimento de sistemas de fornecimento de energia elétrica, **Eletrodinâmica Técnica**, Vol. 13, No. 6, 1990, pp. 77-83 (em russo-traduzido pelo professor orientador).
48. R.A. Aliev, A.E. Zerkovnij e F.A. Mamedova, **Controle de Produção com Informação Inicial Fuzzy**. Moscou: Energoatomizdat, 1991 (em russo-traduzido pelo professor orientador).
49. L.A. Zadeh, Fuzzy sets. **Information and Control**, Vol. 8, pp. 338-353. 1965.
50. E. H. Mamdani, Applications of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plant, **Proceedings IEEE**, Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588, 1974.
51. A. Kandel and G. Langholz (ed.), **Fuzzy Control Systems**. Boca Raton: CRC Press, 1993.
52. D.A. Pospelov (ed.), **Conjuntos Fuzzy em Modelos de Controle e Inteligência Artificial**. Moscou: Nauka, 1986 (em russo-traduzido pelo professor orientador).
53. L.H. Tsoukalas and R.E. Uhrig, **Fuzzy and Neural Approaches in Engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1997.
54. S. Sandri, C. Correa, Lógica Nebulosa, **V Escola de Redes Neurais: Conselho Regional de Redes Neurais**, 1999, pp. c073-c090.
55. E. Cox, **The Fuzzy Systems Handbook – A Practitioner’s Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems**. New York: Academic Press, 1994.
56. G.J. Klir and B. Yuan, **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic, Theory and Applications**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995.
57. V.A. Popov and P.Ya. Ekel, Fuzzy set theory and problems of controlling the design and operation of electric power systems, **Soviet Journal of Computer and System Sciences**, Vol. 25, No. 4, 1987, pp. 92-99 (printed in the USA).
58. M. E. El-Hawary, **Electric Power Applications of Fuzzy Systems**. New York: IEEE PRESS, 1998.

59. L.A. Zadeh, The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: parts 1-3, **Information Sciences** Vol. 8, pp. 199-249, pp. 301-357 and Vol. 9, pp. 43-80, 1975.
60. P.Ya. Ekel, M.F.D. Junges, J.L.T. Morra, and F.P.G. Paletta, Fuzzy logic based approach to voltage and reactive power control in power systems, **International Journal of Computer Research**, Vol. 11, No. 2, 2002, pp. 159-170.
61. P.Ya. Ekel, L.D.B. Terra, M.F.D. Junges, F.J.A. Oliveira, R. Kowaltschuk, and T.Y. Taguti, Fuzzy logic in voltage and reactive power control in power systems, in **Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications**. Hawaii, 1999, pp. 622-627.
62. P.Ya. Ekel, L.D.B. Terra, F.P.G. Paletta, and Z.A. Styczynski, Fuzzy technology in design, planning, and control of complex systems (on the example of power engineering problems), in **Electrical and Computer Engineering Series: Signal Processing, Communications and Computer Science**, New York: WSES Press, 2000, pp. 333-338.
63. P.Ya. Ekel, L.D.B. Terra, M.F.D. Junges, F.J.A. de Oliveira, R. Kowaltschuk, L. Mikami, J.R.P. da Silva, and T.Yu. Taguti, An approach to constructing sensitivity indices and fuzzy control of system voltage and reactive power, in **Proceedings of the 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference**. New Orleans, Vol. 2, 1999, pp. 759-764.
64. A.J. Monticelli, **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. Sao Paulo: Edgar Blücher, 1983.
65. P.I. Ekel, V.A. Popov e A.I. Klushnik, Análise da reação de redes de alimentação em problemas de otimização de redes de distribuição, **Redes e Sistemas Elétricas**, Vol. 22, 1986, pp. 65-72 (em russo-traduzido pelo professor orientador).
66. P.Ya. Ekel, P.P. da Costa Jr., M.D.F. Junges, A. de Melo Oliveira and V.A. Popov, Multicriteria optimization of network configuration in distribution systems with taking into account a feed system reaction, em **Anais do III Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica**. São Paulo, 1998, pp. 597-601
67. C.R. Hicks, **Fundamental Concepts in the Design of Experiments**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1973.
68. V.I. Barabaschuk, B.P. Kredentser e V.I. Miroshnitchenko, **Planejamento de Experimentos em Engenharia**. Kiev: Tekhnika, 1984 (em russo-traduzido pelo professor orientador).
69. B.B. Neto, I.S. Scarmínio e R.E. Bruns, **Planejamento e Otimização de Experimentos**. São Paulo: Editora da UNICAMP, 1995.
70. G.E.P. Box, W.G. Hunter, and J.S. Hunter, **Statistics for Experiments. An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building**. New York: John Wiley & Sons, 1978.
71. N.K. Krug, A.D. Koreneva e L.V. Yarnikh, Uma questão sobre a análise de modos de operação de sistemas elétricos em condições de informação inicial definida probabilisticamente, **Revista da Academia de Ciências da URSS. Energética e Transporte**, Vol. 9, No. 5, 1971, pp. 52-56 (em russo-traduzido pelo professor orientador)

72. J.S Fonseca, G.A. Martins e G.L.Toledo, **Estatística Aplicada**. São Paulo: Editora Atlas, 5ª Ed., 1995.
73. M. R. Spiegel, **Estatística**, Sao Paulo: MacGraw-Hill do Brasil, 1974.
74. F.A. Gomide and R.R. Gudwin, Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy, **SBA – Controle & Automação**, Vol. 4, No. 3, 1994, pp. 97-113.
75. F. Gomide e R. Gudwin, Controle de processos por lógica fuzzy, **Automação e Controle**, Vol. 4, No. 5, 1994, pp. 39-48.
76. W. Pedrycz, **Fuzzy Control and Fuzzy Systems**. New York: John Wiley & Sons, 1993.
77. E. Sanchez, Resolution of eigen fuzzy sets equations, **Fuzzy Sets and Systems**, Vol.1, No.1, 1978, pp. 69-74.
78. B. Kosco, **Neural networks and fuzzy systems: A dynamical systems approach to machine intelligence**, Engelwood Cliffs, 1992. and **Fuzzy Engineering**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
79. A. De Luca, S. Termini, A definition of nonprobabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory, **Information Control**, Vol. 20, 1972, pp. 301-312.
80. A.V. Patel and B.M. Mohan, Some numerical aspects of center of area defuzzification method, **Fuzzy Sets and Systems**, Vol. 132, No. 3, 2002, pp. 401-409.
81. D. P. Filev, R.R.Yager, Fuzzy Models Induced by Alternative Defuzzification Methods, in **Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems**, New Orleans, 1996, pp. 457-462.
82. L.Rondeau, R.Ruelas, L.Levrat and M.Lamotte, A defuzzification method respecting the fuzzification, **Fuzzy Sets and Systems**, Vol. 86, No. 3, 1997, pp.311-320.
83. W.V.Leekwijck, E.E.Kerre, Defuzzification: criteria and classification,**Fuzzy Sets and Systems**, Vol. 108, No. 2, 1999, pp.159-178.
84. B.N. Petrov, G.M Ulanov, I.I Goldenblat, C.V. Ulyanov, Aspectos informativos e termodinâmicos dos sistemas dinâmicos de controle em desenvolvimento, em **Cibernética Técnica: Resultados de Ciência e Técnica**. Moscou: VINITI, 1978, Vol. 10, pp. 5-119 (em russo-traduzido pelo professor orientador).
85. P.Ya. Ekel, Approach to decision making in fuzzy environment, **International Journal of Computers and Mathematics with Applications**, Vol. 37, No. 4/5, 1999, pp. 59-72.
86. P.Ya. Ekel, Methods of decision making in fuzzy environment and their applications, **Nonlinear Analysis: Theory, Methods and Applications** Vol. 47, No. 5. 2001, pp. 979-990
87. Bellman, R.E. & Zadeh, L.A. Decision-making in a fuzzy environment, **Management Science**, Vol 17, No. 4, 1970, pp. B141-B164.
88. P.Ya. Ekel, Fuzzy sets and models of decisions making, **Computer and Mathematics with Applications**, Vol. 44, No. 7, 2002, pp. 863-875.

89. P.Ia. Ekel, R.L.J. Carnevalli, B.M. Mendonça Neta, D.L. Souza, R.M. Palhares, Modelos e métodos de tomada de decisões em ambiente fuzzy e suas aplicações, em **Anais do XXXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Natal, 2003, pp. 980-990.
90. V.V. Zorin and P.Ya. Ekel, Discrete-optimization methods for electrical supply systems, **IEEE Power Engineering**, Vol. 18, No. 5, pp.65-75.
91. P.Ya. Ekel and E.A. Galperin, Box-triangular multiobjective linear programs for resource allocation with application to load management and energy market problems, **Mathematical and Computer Modelling**, Vol. 37, No. 1, 2003, pp. 1-17.