UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Rodrigo Luz Campi

**Modelagem fuzzy da concentração dos gases
dissolvidos em óleo mineral isolante de
transformadores baseada em resultados de ensaios
físico-químicos**

São Carlos
2014

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Rodrigo Luz Campi

**Modelagem fuzzy da concentração dos gases
dissolvidos em óleo mineral isolante de
transformadores baseada em resultados de ensaios
físico-químicos**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas dinâmicos

Orientador: Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino

São Carlos
2014

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível da EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C196m Campi, Rodigo Luz
Modelagem fuzzy da concentração dos gases
dissolvidos em óleo mineral isolante de transformadores
baseada em resultados de ensaios físico-químicos /
Rodigo Luz Campi; orientador Prof. Rogério Andrade
Flauzino. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Sistemas Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Transformadores de potência. 2. Ensaio
físico-químico. 3. Ensaio cromatográfico. 4.
Sistemas de inferência fuzzy. 5. Óleo mineral
isolante. 6. Identificação de falhas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RODRIGO LUZ CAMPI**.

Título da dissertação: "Modelagem fuzzy da concentração dos gases dissolvidos em óleo mineral isolante de transformadores baseada em resultados de ensaios físico-químicos".

Data da defesa: 19/02/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Rogério Andrade Flauzino (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Ivan Nunes da Silva**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **José Roberto Sanches Mantovani**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP- Ilha Solteira)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação às pessoas mais importantes para mim, minha adorada esposa Maria Carolina Nogueira Campi sempre paciente e me suportando em todos os momentos de nossas vidas, ao meu filho Rafael Nogueira Campi que engrandeceu de forma fantástica minha vida, aos meus pais Luiz Antonio Campi e Eda Maria Teixeira Luz Campi responsáveis pela minha vida, formação e a quem devo meu caráter, e ao meu irmão Alexandre Luz Campi por todas as alegrias e experiências trocadas durante nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminho nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

Ao orientador e amigo Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino pela oportunidade, confiança e mentoria no decorrer do desenvolvimento desse trabalho. Contribuindo para meu desenvolvimento profissional.

Ao professor Dr. Ivan Nunes da Silva pelos ensinamentos em sistemas inteligentes e contribuições para este trabalho.

À todas as pessoas que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração desse trabalho.

Aos colegas de laboratório, em especial à Marcelo Suetake, por toda ajuda e ensinamento.

Aos meus familiares e amigos que fizeram parte desses momentos sempre me ajudando e incentivando.

À Halliburton e aos colegas de trabalho pelas oportunidades de desenvolvimento e ensinamentos trocados ao longo desse anos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (EESC-USP) pela oportunidade de ser um membro dessa grande equipe.

Meus agradecimentos à USP que me acolheu como um de seus filhos me proporcionando uma oportunidade ímpar em minha vida.

"É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota." (Theodore Roosevelt)

RESUMO

CAMPI, L. R. Modelagem fuzzy da concentração dos gases dissolvidos em óleo mineral isolante de transformadores baseada em resultados de ensaios físico-químicos. 2013. XX f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. O objetivo desse trabalho foi de fazer a modelagem por meio de sistemas de inferência fuzzy da concentração dos gases dissolvidos em óleo mineral isolante à partir dos resultados de ensaios físico-químicos. Dessa forma, objetivou-se estender as técnicas de identificação de falhas em transformadores por meio da análise dos ensaios físico-químicos do óleo isolante. Para tanto adotou-se um mapeamento entre os dados de ensaios físico-químicos e de cromatografia gasosa feito por meio de sistemas de inferência fuzzy. Assim, por meio de resultados de ensaios físico-químicos, como cor, densidade, unidade, entre outro, tem-se uma estimativa da concentração dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante do transformador. Assim, torna-se possível empregar técnicas de identificação de falhas baseadas na concentração dos gases dissolvidos, mas, valendo-se dos dados de ensaios físico-químicos. O sistema proposto foi validado por meio de dados reais e os resultados alcançados são compatíveis com aqueles obtidos por meio das técnicas convencionais.

Palavras-chave: Sistemas de inferência fuzzy, Óleo mineral isolante, Identificação de sistemas, Manutenção preditiva, Sistemas elétricos de potência, Identificação de falhas em transformadores.

ABSTRACT

CAMPI, L. R. Fuzzy approaching of the concentration of dissolved gases in insulating mineral oil based on physical-chemical results. 2013. XX f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. The objective of this work was to do a modeling using the inference fuzzy system of the concentration of dissolved gases in insulating mineral oil getting from the physical-chemical results. The idea was to understand the techniques to identify failures on transformers by analyzing the physical-chemical results of the insulating mineral oil. To do that, the data from physical-chemical results and chromatographic results was mapped using the inference fuzzy system. So, by the results of the physical-chemical experiment such as color, density, humidity and so on, it's possible to have a estimation of the concentration of dissolved gases in insulating mineral oil. Therefore, it's possible to implement techniques to identify failures based on the concentration of dissolved gases using physical-chemical techniques. The propose system was validated by real data. The results using physical-chemical techniques were similar with the results using conventional techniques.

Keywords: Inference fuzzy system, insulating mineral oil, system identification, predictive maintenance, electric power systems, transformer failures identification.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - DISTRIBUIÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA (FONTE: ADAPTADO DE ANEEL (2007)).....	5
FIGURA 1.2 - ESCALA EVOLUTIVA DOS TIPOS DE MANUTENÇÃO	10
FIGURA 2.1 – ESQUEMA DO SISTEMA DE ISOLAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.	13
FIGURA 2.2 – HIDROCARBONETOS PARAFÍNICOS.	14
FIGURA 2.3 – HIDROCARBONETOS NAFTÊNICOS.	15
FIGURA 2.4 – MÉTODO DO DENSÍMETRO.	19
FIGURA 2.5 – GRÁFICO PARA FALHA INCIPIENTE.	29
FIGURA 2.6 – O TRIÂNGULO DE DUVAL.....	32
FIGURA 3.1 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.....	38
FIGURA 3.2 – REPRESENTAÇÃO DA VARIÁVEL LINGÜÍSTICA TEMPERATURA.....	40
FIGURA 3.3 – MECANISMO DE INFERÊNCIA FUZZY.	42
FIGURA 3.4 – REPRESENTAÇÃO DAS ENTRADAS DO SISTEMA FUZZY MULTICAMADAS.	50
FIGURA 3.5 – SISTEMA FUZZY MULTICAMADA.	52
FIGURA 3.6 – ALGORITMO DE EXTRAÇÃO DE REGRAS FUZZY.	54
FIGURA 3.7 – ALGORITMO DE SINTONIA PARAMÉTRICA.	57
FIGURA 4.1 – ARQUITETURA DO SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO DOS GASES	60
FIGURA 4.2 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA INICIAL DO H_2 . 72	
FIGURA 4.3 – COMPARAÇÃO INICIAL ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO H_2	72
FIGURA 4.4 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE INICIAL PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO H_2	73
FIGURA 4.5 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA INICIAL DO O_2 . 74	
FIGURA 4.6 – COMPARAÇÃO INICIAL ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO O_2	74
FIGURA 4.7 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE INICIAL PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO O_2	75
FIGURA 4.8 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA INICIAL DO N_2 . 76	
FIGURA 4.9 – COMPARAÇÃO INICIAL ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO N_2	76
FIGURA 4.10 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE INICIAL PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO N_2	77
FIGURA 4.11 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA INICIAL DO CO.	78
FIGURA 4.12 – COMPARAÇÃO INICIAL ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO CO.	78
FIGURA 4.13 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE INICIAL PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO CO.	79
FIGURA 4.14 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA INICIAL DO CH_4	80

FIGURA 4.15 – COMPARAÇÃO INICIAL ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO CH ₄ .	80
FIGURA 4.16 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE INICIAL PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO CH ₄ .	81
FIGURA 4.17 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA INICIAL DO CO ₂ .	82
FIGURA 4.18 – COMPARAÇÃO INICIAL ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO CO ₂ .	82
FIGURA 4.19 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE INICIAL PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO CO ₂ .	83
FIGURA 4.20 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA INICIAL DO C ₂ H ₄ .	84
FIGURA 4.21 – COMPARAÇÃO INICIAL ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO C ₂ H ₄ .	84
FIGURA 4.22 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE INICIAL PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO C ₂ H ₄ .	85
FIGURA 4.23 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA INICIAL DO C ₂ H ₆ .	86
FIGURA 4.24 – COMPARAÇÃO INICIAL ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO C ₂ H ₆ .	86
FIGURA 4.25 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE INICIAL PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO C ₂ H ₆ .	87
FIGURA 4.26 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA INICIAL DO C ₂ H ₂ .	88
FIGURA 4.27 – COMPARAÇÃO INICIAL ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO C ₂ H ₂ .	88
FIGURA 4.28 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE INICIAL PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO C ₂ H ₂ .	89
FIGURA 4.29 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA APRIMORADA DO H ₂ .	90
FIGURA 4.30 – COMPARAÇÃO APRIMORADA ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO H ₂ .	90
FIGURA 4.31 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE APRIMORADA PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO H ₂ .	91
FIGURA 4.32 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA APRIMORADA DO O ₂ .	92
FIGURA 4.33 – COMPARAÇÃO APRIMORADA ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO O ₂ .	92
FIGURA 4.34 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE APRIMORADA PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO O ₂ .	93
FIGURA 4.35 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA APRIMORADA DO N ₂ .	94
FIGURA 4.36 – COMPARAÇÃO APRIMORADA ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO N ₂ .	94
FIGURA 4.37 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE APRIMORADA PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO N ₂ .	95
FIGURA 4.38 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA APRIMORADA DO CO.	96
FIGURA 4.39 – COMPARAÇÃO APRIMORADA ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO CO.	96
FIGURA 4.40 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE APRIMORADA PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO CO.	97

FIGURA 4.41 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA APRIMORADA DO CH ₄ .	98
FIGURA 4.42 – COMPARAÇÃO APRIMORADA ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO CH ₄ .	98
FIGURA 4.43 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE APRIMORADA PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO CH ₄ .	99
FIGURA 4.44 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA APRIMORADA DO CO ₂ .	100
FIGURA 4.45 – COMPARAÇÃO APRIMORADA ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO CO ₂ .	100
FIGURA 4.46 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE APRIMORADA PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO CO ₂ .	101
FIGURA 4.47 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA APRIMORADA DO C ₂ H ₄ .	102
FIGURA 4.48 – COMPARAÇÃO APRIMORADA ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO C ₂ H ₄ .	102
FIGURA 4.49 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE APRIMORADA PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO C ₂ H ₄ .	103
FIGURA 4.50 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA APRIMORADA DO C ₂ H ₆ .	104
FIGURA 4.51 – COMPARAÇÃO APRIMORADA ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO C ₂ H ₆ .	104
FIGURA 4.52 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE APRIMORADA PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO C ₂ H ₆ .	105
FIGURA 4.53 – ERRO QUADRÁTICO MÉDIO PARA O AJUSTE DO SISTEMA FUZZY DE ESTIMATIVA APRIMORADA DO C ₂ H ₂ .	106
FIGURA 4.54 – COMPARAÇÃO APRIMORADA ENTRE OS DADOS DESEJADOS E OS ESTIMADOS REFERENTES AO C ₂ H ₂ .	106
FIGURA 4.55 – FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILIDADE APRIMORADA PARA O ERRO DE ESTIMAÇÃO DO C ₂ H ₂ .	107

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – MECANISMO DE PEROXIDAÇÃO	16
TABELA 2.2 – COMPOSTOS RESULTANTES DAS REAÇÕES DE POLIMERIZAÇÃO.....	17
TABELA 2.3 – NORMAS A SEREM APLICADAS NOS ENSAIOS DO ÓLEO ISOLANTE.	18
TABELA 2.4 – CLASSIFICAÇÃO DO OMI.....	22
TABELA 2.5 – GASES ANALISADOS PELA DGA.	24
TABELA 2.6 – COMPARAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS PARA O DIAGNÓSTICO DE FALHAS.....	27
TABELA 2.7 – IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS POR MEIO DO MÉTODO DE ROGERS.	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
TABELA 2.8 – IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS ATRAVÉS DO MÉTODO DE DORNENBURG.....	29
TABELA 2.9 – PERFIS TÍPICOS DE COMPARAÇÃO.	30
TABELA 2.10 – RELAÇÃO DOS CÓDIGOS IEC.....	31
TABELA 2.11 – CLASSIFICAÇÃO DA FALHA CONFORME RELAÇÃO DE CÓDIGOS IEC.	31
TABELA 2.12 – CONDIÇÕES DE FALHAS NO TRIÂNGULO DE DUVAL.	33
TABELA 4.1 – DADOS REAIS UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DO SISTEMA FUZZY PROPOSTO.....	60
TABELA 4.2 – CRITÉRIOS DO MÉTODO IEEE PARA IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM TRANSFORMADORES.	107
TABELA 4.3 – ERRO ABSOLUTO MÉDIO DE ESTIMAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DOS GASES.	108
TABELA 4.4 – ERRO PPM MÉDIO DE ESTIMAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DOS GASES.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
MME	Ministério de Minas e Energia
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
OMI	Óleo Mineral Isolante
RNA	Redes Neurais Artificiais
ANFIS	<i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i>
C _P	Percentual de Carbonos Parafínicos
C _N	Percentual de Carbonos Naftênicos
C _A	Percentual de Carbonos Aromáticos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
OQIN	Índice de Qualidade do Sistema
MIN	Número Índice de Myers
IFT	Tensão Interfacial
NN	Número de Neutralização
DBPC	Antioxidante Sintético di-terc-butil-p-cresol
DGA	<i>Dissolved Gas Analysis</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
CDA	Método do Centro de Massa
TS	Modelo de Takagi-Sugeno
TSK	Modelo Takagi-Sugeno-Kang
SIF	Sistemas de Inferência Fuzzy
FSOM	<i>Fuzzy Self Organized Map</i>
NEFCLASS	<i>Neuro-Fuzzy Classification</i>
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários

LISTA DE SÍMBOLOS

W	Watts
tep	toneladas equivalentes de petróleo
°C	graus Célsius
V	Volts
ppm	Partes por milhão
N	Newtons
m	metros
g	gramas
h	horas

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução à Dissertação de Mestrado	5
1.1 Motivação e relevância do trabalho	5
1.2 Proposta e justificativa da dissertação	8
1.3 Objetivos	11
1.4 Organização da Dissertação	11
Capítulo 2. Aspectos do Óleo Isolante Utilizado em Transformadores de Potência.....	13
2.1 Introdução.....	13
2.2 Análises Físico-Químicas do Óleo Isolante	17
2.2.1 Ensaios de Cor.....	18
2.2.2 Densidade	18
2.2.3 Perdas Dielétricas	19
2.2.4 Rigidez Dielétrica.....	20
2.2.5 Teor de Água.....	20
2.2.6 Tensão Interfacial.....	21
2.2.7 Índice de Neutralização	21
2.3 Índice de Qualidade do Sistema (OQIN)	22
2.4 Tratamentos Empregados na Recuperação do OMI em Uso	22
2.5 Análises Cromatográficas do Estado do Óleo Isolante	24
2.6 Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência.....	26
2.6.1 Método de Rogers	27
2.6.2 Método de Dornenburg	28
2.6.3 Método do Gás Chave.....	29
2.6.4 Relação dos Códigos IEC	30

2.6.5	Triângulo de Duval	31
Capítulo 3. Ajuste Automático de Sistemas de Inferência Fuzzy		35
3.1	Introdução	35
3.2	Fundamentos Sobre Conjuntos e Lógica Fuzzy	37
3.3	Definição de Operações e Operadores da Lógica Fuzzy	38
3.3.1	Regras de Inferência Fuzzy	39
3.3.2	Agregação	41
3.4	Técnicas Para o Ajuste Estrutural e Paramétrico de Sistemas de Inferência Fuzzy 42	
3.5	Modelo do Sistema Fuzzy Multicamadas	47
3.5.1	Camada de Entrada	48
3.5.2	Camada de Inferência	50
3.5.3	Camada de Saída.....	51
3.6	Ajuste Estrutural de Sistemas de Inferência Fuzzy	52
3.7	Ajuste Paramétrico de Sistemas de Inferência Fuzzy	54
3.8	Considerações Sobre o Sistema Fuzzy Multicamadas	57
Capítulo 4. Mapeamento nebuloso dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante a partir de ensaios físico-químicos		59
4.1	Abordagem fuzzy para estimação aprimorada dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante	59
4.2	Dados empregados no desenvolvimento do sistema proposto	60
4.3	Sistemas fuzzy para estimação inicial dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante	71
4.3.1	Sistema fuzzy para estimação inicial do gás hidrogênio (H ₂)	71
4.3.2	Sistema fuzzy para estimação inicial do gás oxigênio (O ₂).....	73
4.3.3	Sistema fuzzy para estimação inicial do gás nitrogênio (N ₂)	75
4.3.4	Sistema fuzzy para estimação inicial do monóxido de carbono (CO).....	77

4.3.5	Sistema fuzzy para estimação inicial do metano (CH_4)	79
4.3.6	Sistema fuzzy para estimação inicial do dióxido de carbono (CO_2)	81
4.3.7	Sistema fuzzy para estimação inicial do etileno (C_2H_4)	83
4.3.8	Sistema fuzzy para estimação inicial do etano (C_2H_6)	85
4.3.9	Sistema fuzzy para estimação inicial do acetileno (C_2H_2)	87
4.4	Sistemas fuzzy para estimação aprimorada dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante	89
4.4.1	Sistema fuzzy para estimação aprimorada do gás hidrogênio (H_2)	89
4.4.2	Sistema fuzzy para estimação aprimorada do gás oxigênio (O_2)	91
4.4.3	Sistema fuzzy para estimação aprimorada do gás nitrogênio (N_2)	93
4.4.4	Sistema fuzzy para estimação aprimorada do monóxido de carbono (CO)	95
4.4.5	Sistema fuzzy para estimação aprimorada do metano (CH_4)	97
4.4.6	Sistema fuzzy para estimação aprimorada do dióxido de carbono (CO_2)	99
4.4.7	Sistema fuzzy para estimação aprimorada do etileno (C_2H_4)	101
4.4.8	Sistema fuzzy para estimação aprimorada do etano (C_2H_6)	103
4.4.9	Sistema fuzzy para estimação aprimorada do acetileno (C_2H_2)	105
4.5	Considerações referentes ao emprego da estimação de gases na determinação da condição operativa de transformadores	107
Capítulo 5. Conclusões e trabalhos futuros		111

Capítulo 1. INTRODUÇÃO À DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

O desenvolvimento de toda e qualquer nação, tanto no aspecto econômico quanto no social, depende diretamente de sua disponibilidade de recursos energéticos. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica –ANEEL (2007), a geração atual de energia elétrica é da ordem 99GW e está dividida de acordo com a Figura 1.1

Figura 1.1 - Distribuição da matriz energética brasileira (Fonte: Adaptado de Aneel (2007))

Estudos apresentados pela Empresa de Pesquisa Energética –EPE, ligada ao Ministério de Minas e Energia –MME, revelam que a demanda per capita de energia quase dobrará até 2030, passando dos atuais 1,2 toneladas equivalentes de petróleo, tep, para 2,3 tep. A projeção tem como base um crescimento da economia brasileira da ordem de 4,1% ao ano, o que implicaria em um aumento da demanda por energia primária que poderia variar de 5% ao ano (até 2010) a 3,5% ao ano (entre 2020 e 2030) e, portanto, resultaria em uma expansão dos atuais 218,7 milhões de tep para cerca de 555 milhões de tep (EPE, 2007).

Para atender a esse incremento no consumo, a EPE estimou que o Brasil deveria investir no período cerca de US\$ 800 bilhões, em torno de R\$ 62,4 bilhões por ano, dos quais cerca de 80% nos setores de petróleo e energia elétrica. Deste total, R\$ 274 bilhões já estão previstos, até 2010, por meio do Programa de Aceleração do Crescimento - PAC.

Com tantos investimentos previstos na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, o interesse e preocupação com a qualidade e confiabilidade no fornecimento da energia elétrica devem ser cada vez maiores, uma vez que problemas gerados pela falta ou má qualidade da eletricidade em qualquer um desses setores, implica em multas e compensações financeiras previstas por lei.

Dentre o conjunto de equipamentos do sistema elétrico, os transformadores de potência se destacam tanto por sua importância quanto pelos custos associados aos mesmos. Os transformadores são máquinas estáticas que transferem energia elétrica de um circuito para o outro, mantendo a mesma frequência e, normalmente, adequando os valores de tensão e, eventualmente, os de corrente. De maneira geral, a função de um transformador de potência é fazer a adequação dos níveis de tensão entre a geração, a transmissão e a distribuição (NYNÄS, 2004).

Essa adequação de tensão é feita para se atender a diferentes almejos técnicos dos quais se destaca a redução das perdas em transmissão por redução da corrente requerida para transmitir uma determinada potência elétrica. Esta transferência de energia é acompanhada de perdas que dependem das características construtivas do transformador, do seu regime de funcionamento e de sua manutenção.

Dos entes constituintes do transformador de potência destaca-se a sua isolação a qual é, basicamente, constituída pelo óleo mineral isolante (OMI) e pela isolação sólida celulósica. Esse destaque se dá principalmente porque são nesses elementos que as falhas operativas têm seu início.

Durante seu funcionamento, vários processos de desgaste e de envelhecimento podem ocorrer no sistema de isolamento dos transformadores. Pode-se citar como exemplos pontos quentes, sobreaquecimentos, sobretensões, dentre outros fenômenos que alteram o sistema de isolação do transformador. Sendo assim, a diminuição da vida útil dos transformadores está diretamente ligada à deterioração dos materiais dielétricos utilizados na fabricação dos mesmos. Nesse sentido, tem-se um importante aspecto motivador para o desenvolvimento de programas de supervisão e manutenção preventiva de forma a

proporcionar um aumento na vida útil dos equipamentos e consequentemente uma melhor gestão dos mesmos sob gerência das concessionárias de energia elétrica.

Dentre as metodologias utilizadas para identificação de falhas em transformadores de potência imersos em OMI, destacam-se a identificação de falhas em transformadores por meio do monitoramento das grandezas elétricas do equipamento, por monitoramento acústico da unidade transformadora e pela avaliação das concentrações dos gases dissolvidos no OMI do transformador.

Para a identificação de falhas através do monitoramento das grandezas elétricas destacam-se duas metodologias. A primeira é baseada na verificação constante da resposta em frequência obtida através da análise sistemática das grandezas elétricas mensuradas (BIRLASEKARAN et al, 2000) e a segunda é baseada na avaliação da função de transferência do equipamento (ISLAM & LEDWICH, 1998), tendo como principal vantagem a identificação das falhas em tempo real. No entanto, a grande desvantagem é a complexidade na realização de análises referentes ao grau de deterioração do isolante.

No caso da identificação de falhas através do monitoramento acústico, realiza-se um comparativo entre um padrão do espectro sonoro de um transformador em condições normais de operação (transformador padrão) com um transformador no qual o monitoramento de falhas quer ser medido. Igualmente ao caso anterior (identificação de falhas através do monitoramento das grandezas elétricas), a eficiência quanto à estimação do grau de deterioração do isolante é baixíssima, além da falha ser identificada apenas quando já estão instaladas no equipamento (DUVAL, 2002).

Para a identificação de falhas por meio da avaliação das concentrações dos gases dissolvidos no OMI são realizados ensaios cromatográficos os quais resultam nas concentrações dos gases dissolvidos no OMI. A análise dos gases dissolvidos no OMI se baseia na constatação de que as falhas provenientes de descargas parciais, descargas de alta energia, efeito corona, sobreaquecimento, entre outras, interagem com o OMI provocando alterações em suas propriedades físico-químicas, provocando o desprendimento de gases no qual acabam reagindo com o óleo e se dissolvendo.

Além dos ensaios cromatográficos, com os quais é possível obter os valores volumétricos dos principais gases dissolvidos no óleo, têm-se os ensaios físico-químicos que permitem identificar diversas características físicas e químicas do OMI. As principais características levantadas pela análise físico-química são a cor, a densidade, a rigidez dielétrica,

a tensão interfacial, o teor de água, o índice de neutralização e o fator de potência do óleo mineral. Uma importante característica dos ensaios físico-químicos é que todos esses ensaios podem ser realizados no local onde o transformador está instalado, sendo que parte deles pode ser realizada com o equipamento em funcionamento, isso é, sem que haja a interrupção no fornecimento da energia elétrica.

Evidencia-se então a importância e motivação de um sistema para estimação dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante mediante aos resultados dos ensaios físicos químicos. Desta forma, seria possível adaptar as metodologias existentes, baseadas na concentração dos gases dissolvidos, para, a partir dos ensaios físico-químicos, prever possíveis falhas incipientes nos transformadores de potência.

Como a estimativa desses resultados constitui um problema complexo, por não possuir uma fórmula matemática capaz de relacionar os testes, uma alternativa interessante é a utilização de técnicas provenientes da inteligência computacional. Dentre essas técnicas podem-se destacar os Sistemas de Inferência Fuzzy e as Redes Neurais Artificiais (RNA) por serem sistemas onde não se faz necessário um conhecimento detalhado sobre o relacionamento entre o espaço das entradas e o espaço das saídas e onde a aplicação é para problemas de caráter não-linear. (ROGER JANG et al, 1997).

Assim, nesse trabalho será empregado o sistema de inferência Fuzzy do tipo Takagi-Sugeno com ajuste paramétrico baseado em regras específicas desenvolvidas para o presente trabalho.

1.2 PROPOSTA E JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO

Apesar de considerarem o assunto fundamental, as empresas dificilmente tratam a redução de custos de forma ampla e sob um enfoque adequado. Ao longo das duas últimas décadas, esse assunto tem sido muito discutido, mas quase sempre com uma abordagem restrita. Há uma tendência de se dissertar muito sobre reengenharia e redefinição de processos.

Mais recentemente, o mercado vivenciou uma onda de novas regulamentações. Hoje, o que se percebe é que esses pontos já estão endereçados. Assim, observa-se uma retomada da discussão sobre projetos relacionados à redução de custo. Para isso, é fundamental inserir medidas de gerenciamento diário, de maneira a se beneficiar, em longo prazo, das providências tomadas no sentido de cortar custos. E não apenas como uma solução

de emergência, ou seja, a política de redução de custo deve ser algo contínuo dentro da empresa.

Seguindo essa tendência de mercado, investimentos em programas para redução de custos são cada vez mais comuns nos diversos setores da economia, isso significa que as concessionárias de energia elétrica também seguem essa tendência. Uma das medidas para redução de custo são investimentos cada vez menores em reparos de equipamentos, uma vez que a manutenção resulta em dois problemas graves. O primeiro problema se refere ao preço da própria manutenção do equipamento que normalmente é executada por especialistas com mão-de-obra a custos bem elevados; o segundo problema é a interrupção no fornecimento de energia elétrica para os consumidores, podendo estes ser residencial, comercial ou industrial. O impacto econômico desse segundo problema é bem superior ao primeiro e isso fez com que o tipo de manutenção evoluísse ao longo do tempo.

A Figura 1.2 representa a escala evolutiva dos tipos de manutenção. Pode-se observar que os resultados obtidos através do tipo de manutenção quatro (engenharia de manutenção) são muito superiores aos resultados obtidos através do tipo de manutenção três (preditiva e detectiva) e assim sucessivamente.

A diferenciação de cada tipo de manutenção é descrita a seguir:

- ❖ A manutenção corretiva é a forma mais óbvia e mais primária de manutenção, pois ocorre apenas quando o equipamento não funciona corretamente, por isso, é o tipo de manutenção mais cara quando encarada do ponto de vista total do sistema;
- ❖ A Manutenção preventiva, como o próprio nome sugere, consiste em um trabalho de prevenção de defeitos que possam originar a parada ou um baixo rendimento dos equipamentos em operação. Esta prevenção é feita baseada em estudos estatísticos, estado do equipamento, local de instalação, condições elétricas que os suprem, entre outras;
- ❖ Manutenção preditiva é a atuação realizada com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática, ou seja, previnem falhas nos equipamentos ou sistemas através de acompanhamento de parâmetros diversos, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível;

- ❖ Manutenção detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção buscando detectar falhas ocultas ou não-perceptíveis aos técnicos de operação e manutenção. A principal diferença é o nível de automatização. Na manutenção preditiva, faz-se necessário o diagnóstico a partir da medição de parâmetros; na manutenção detectiva, o diagnóstico é obtido de forma direta a partir do processamento das informações colhidas junto à planta;
- ❖ Praticar engenharia de manutenção é atuar na prevenção, ao se procurar as causas básicas, modificar situações permanentes de mau desempenho, deixar de conviver com problemas crônicos, melhorar padrões e sistemáticas, desenvolver a manutenibilidade, dar *feedback* ao projeto e interferir tecnicamente nas compras.

Figura 1.2 - Escala evolutiva dos tipos de manutenções

Analisando especificamente o caso dos transformadores de potência e se baseando nos tipos de manutenções, estudos das condições do OMI aplicando os conceitos da engenharia de manutenção são cada vez mais frequentes, pois possibilitam uma redução de custo substancial para as concessionárias.

Conforme o conceito de redução de custo, onde sempre há espaço para melhorias, é possível reduzir ainda mais os custos de manutenção nos transformadores de potência.

Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia que, através da avaliação das concentrações dos gases dissolvidos no OMI, seja capaz de determinar os resultados dos testes com custo mais elevado usando como base os dados dos testes baratos. Em outras palavras, fazendo apenas os testes mais baratos e simples, desenvolver um sistema de inferência fuzzy capaz de simular os resultados dos testes mais caros.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é fazer a modelagem da concentração dos gases dissolvidos em óleo mineral isolante a partir dos resultados de ensaios físico-químicos por meio de sistemas de inferência fuzzy. Assim, será ainda verificado como inferir a respeito da ocorrência de falhas incipientes a partir de ensaios físico-químicos e não apenas por meio da concentração dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado está organizada em cinco capítulos. No Capítulo dois são abordados aspectos do óleo isolante utilizado em transformadores de potência tendo como tópicos os aspectos das análises físico-químicas do óleo isolante, os aspectos das análises cromatográficas do estudo do óleo isolantes e os aspectos do diagnóstico de falhas em transformadores de potência.

Para o Capítulo 3, tem-se uma descrição do sistema de inferência fuzzy abordando os aspectos das funções de pertinência, das regras fuzzy, da agregação de regras fuzzy, e da defuzzificação.

O Capítulo quatro divulga os resultados usando a metodologia proposta indicando alguns casos experimentais. O Capítulo cinco apresenta as conclusões gerais referentes à pesquisa apresentada nesse trabalho e propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2. ASPECTOS DO ÓLEO ISOLANTE UTILIZADO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

2.1 INTRODUÇÃO

Como exposto no 0, o transformador é um equipamento de extrema importância e de custos elevados constituído, resumidamente, por dois ou três enrolamentos, pelo núcleo e pelo sistema de isolamento. Os enrolamentos são dispostos de tal forma que o fluxo magnético seja concatenado com um mínimo de dispersão. O núcleo é o meio pelo qual o fluxo magnético encontra um caminho de baixa relutância e por onde, preferencialmente, flui. Entre esses elementos, núcleo, enrolamentos e o tanque do transformador, tem-se o sistema de isolamento. O sistema de isolamento é constituído essencialmente pelo papel isolante e pelo óleo mineral isolante. Faz parte do sistema de isolamento o revestimento do núcleo, o esmalte dos condutores metálicos, o cadarço e a pintura do tanque do transformador. A Figura 2.1 ilustra de forma esquemática a disposição dos materiais constituintes do sistema de isolamento em relação aos demais elementos constituintes do transformador.

Figura 2.1 – Esquema do sistema de isolamento de um transformador de potência.

Figura 2.3– Hidrocarbonetos Naftênicos.

Dependendo do tipo de petróleo utilizado na destilação fracionária, o óleo isolante pode possuir base parafínica (óleo parafínico) ou base naftênica (óleo naftênico). Sua classificação é baseada na norma ASTM D 2140-91 (1991) e é feita or meio de resultados do percentual de carbonos parafínicos (C_P), naftênicos (C_N) e aromáticos (C_A). Essa classificação pode ser obtida empregando técnicas de espectroscopia, na região do infravermelho, pela determinação da quantidade de carbonos parafínicos. Óleos com C_P inferiores a 50% são considerados naftênicos, enquanto que aqueles com C_P iguais ou superiores a 56% são classificados como parafínicos; para os valores entre 50 e 56% são óleos intermediários (NYNÄS, 2004).

Quando óleos minerais diferentes são misturados, as propriedades da mistura resultante serão uma média das propriedades de cada um dos componentes, desde que os óleos misturados sejam de boa qualidade. Caso um desses componentes seja de má qualidade, o óleo resultante será de baixa qualidade (MILASCH 1984).

Para se testar o OMI é necessário que ele esteja em operação, pois em regime de operação o óleo passa por um processo de envelhecimento. Esse envelhecimento deve-se à solicitação por elevação de temperatura, à ação do oxigênio e ao contato com materiais presentes em sua construção, resultando na deterioração das propriedades do óleo. Essa deterioração gera subprodutos que promovem a aceleração da deterioração, ou seja, gera uma reação em cadeia onde o OMI perde suas propriedades isolantes e com isso a celulose degrada-se gerando borra. O processo que rege a oxidação dos hidrocarbonetos é o mecanismo de peroxidação, formação de peróxidos, onde há a formação de produtos intermediários que podem ser os álcoois, aldeídos e cetonas dependendo da espécie que lhes deu origem (LIPSTEIN; SHAKNOVISH, 1970).

O grande problema na formação dos produtos intermediários é que na presença de oxigênio geram ácidos carboxílicos, nocivos ao papel isolante e aos demais materiais que

constituem o transformador. Ilustrativamente, tem-se um exemplo apresentado por (GRANADO 2001) na forma da Tabela 2.1.

Tabela 2.1– Mecanismo de peroxidação

Início da reação:	$2R-H + O_2 \rightarrow 2R\bullet + H_2O_2$
Formação de radical livre $R\bullet$	
Formação de radical peróxido $R-O-O\bullet$	$R\bullet + O_2 \rightarrow R-O-O\bullet$
Formação de Hidroperóxido ROOH	$R-O-O\bullet + R'-H \rightarrow ROOH + R'\bullet$
Transformação do Hidroperóxido em Radical Peróxido	$ROOH + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow ROO\bullet + \bullet OH$
Combinação dos Radicais Formados	$R\bullet + R\bullet \rightarrow R-R$ $R\bullet + ROO\bullet \rightarrow ROOR$
Término da reação em cadeia	$ROO\bullet + R'OO\bullet \rightarrow ROH + RCOR' + O$

Numa etapa final ocorrem às chamadas reações de polimerização, onde vários compostos reagem originando a borra, um composto de alto peso molecular, mais pesado que o óleo, insolúvel e de natureza ácida que se deposita nos enrolamentos. Assim, a transferência de calor do cobre para o óleo é comprometida, elevando a temperatura do papel isolante e o atacando quimicamente (MILASCH 1984). Ilustrativamente, novamente por (GRANADO 2001), segue a Tabela 2.2.

Quando o OMI perde suas propriedades isolantes, há duas formas para recuperação do transformador: a substituição ou a regeneração. Em ambos os casos, é de extrema importância verificar se esse fluido atende às características dielétricas, a fim de evitar a degradação prematura do isolamento sólido do transformador.

Para que não aconteça a degradação prematura, traduzido em prejuízo financeiro, é necessário o monitoramento das propriedades físico-químicas do OMI. Por meio das análises das características físico-químicas é possível avaliar a qualidade tanto do óleo quanto do próprio transformador (MORAES, 1990). Essas análises são de extrema importância à manutenção de equipamentos elétricos, permitindo a intervenção planejada no equipamento para correção de defeitos e, em alguns casos, diagnósticos precoces de falhas.

Tabela 2.2– Compostos resultantes das reações de polimerização.

Formação de álcool e cetona a partir de hidroperóxido terciário	$ \begin{array}{c} \text{R} \\ \\ \text{R} - \text{C} - \text{OOH} \\ \\ \text{R} \end{array} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{c} \text{R} \\ \\ \text{R} - \text{C} - \text{OOH} + \text{O} \bullet \\ \\ \text{R} \\ \text{ÁLCOOL} \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R} - \text{C} - \text{R} \\ \text{CETONA} \end{array} + \text{R} - \text{OH} $
Formação de cetona e ácido a partir de hidroperóxido secundário	$ \begin{array}{c} \text{R} \quad \text{R} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{CH} - \text{OOH} \end{array} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R} - \text{C} - \text{R} \\ \text{CETONA} \end{array} + \text{H}_2\text{O} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R} - \text{C} - \text{OH} \\ \text{ÁCIDO} \end{array} + \text{RH} $
Formação de aldeído e ácido a partir de hidroperóxido primário	$ \text{R} - \text{CH}_2 - \text{OOH} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R} - \text{C} - \text{H} \\ \text{ALDEÍDO} \end{array} + \text{H}_2\text{O} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R} - \text{C} - \text{OH} \\ \text{ÁCIDO} \end{array} + \text{H}_2 $

2.2 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO ÓLEO ISOLANTE

A determinação das propriedades físico-químicas do OMI é de suma importância para garantir as condições operacionais dos transformadores e para manter ou ampliar a vida útil desses equipamentos.

Os vários ensaios realizados no OMI em uso permitem diagnosticar alguns problemas, como pontos quentes, sobreaquecimento e vazamentos, além de informar sobre a qualidade isolante e térmica do próprio OMI. A Tabela 2.3 apresenta todos os testes relacionados com os ensaios físico-químicos e suas respectivas normas.

Além dos ensaios do óleo, feitos com transformador em operação, são também realizados quando necessário testes de isolamento, como por exemplo, o fator de potência e a resistência de isolamento, os quais exigem a desenergização da unidade.

Tabela 2.3– Normas a serem aplicadas nos ensaios do óleo isolante.

Ensaio do óleo isolante	Normas Aplicadas
Cor	ASTM D1524/1999
Densidade	NBR 7148/1992
Tensão Interfacial	NBR 6234/1965
Teor de Água	NBR 5755/1984
Índice de Acidez Total	ASTM D974/1980
Rigidez Dielétrica	NBR 6869/1989
Fator de Potência a 20° C	ASTM D924/1999
Estabilidade à Oxidação	NBR 10504/1988
Viscosidade Cinemática	NBR 10441/1998
Ponto de Anilina	ABNT MB299/1990
Ponto de Fulgor e Combustão	ABNT MB50/1972
Grau de Polimerização em Papel Isolante	NBR 8148/2000
Análise Cromatográfica de Gases	
Ensaio do óleo isolante	NBR 7070/1981

Dos ensaios apontados na Tabela 2.3, os principais ensaios físico-químicos a se destacarem são:

- ❖ Ensaios de cor;
- ❖ Densidade;
- ❖ Perdas dielétricas (Fator de potência);
- ❖ Rigidez dielétrica;
- ❖ Teor de água;
- ❖ Tensão interfacial;
- ❖ Índice de neutralização.

2.2.1 ENSAIOS DE COR

A base desse ensaio é a comparação entre o óleo em teste com uma escala padrão que varia de 0 a 8, além da verificação da presença de partículas sólidas e gotículas de água em suspensão. Para isto, coloca-se uma amostra de óleo num tubo e este num comparador de cores. Este computador possui um disco rotativo que girará até que as cores do óleo coincidam com uma escala de cores-padrão. O número da cor do disco corresponderá à cor do óleo; caso a cor esteja entre duas cores, o resultado será estimado por uma interpolação.

2.2.2 DENSIDADE

A densidade relativa do óleo é definida como a relação entre a massa de determinado volume de óleo e a massa de igual volume de água pura na temperatura de 15°C. É determinada com um densímetro de vidro que tenha uma graduação de 0,600 a 1,100 e divisões de 0,050. A temperatura do óleo será medida com um termômetro, com escala de -5°C a +215°C e divisões de 0,2°C.

O óleo deve ser cuidadosamente colocado numa proveta, evitando a formação de bolhas de ar. O densímetro e o termômetro são mergulhados no óleo. Com o termômetro, agita-se suavemente o líquido. A temperatura ambiente não deve variar mais que 2°C durante a medição. Quando a temperatura for estável e o densímetro estiver flutuando livremente, afastado das paredes da proveta, o densímetro deverá ser lido, conforme indicam os desenhos da Figura 2.4. Esse processo é denominado método do densímetro.

Figura 2.4 – Método do densímetro.

Se o valor da densidade for no máximo igual a 0,860, trata-se de um óleo parafínico e se for igual a 0,900, tem-se um óleo naftênico. Valores diferentes podem indicar contaminação por compostos indesejados.

2.2.3 PERDAS DIELÉTRICAS

As perdas dielétricas são medidas em um líquido isolante quando este é submetido a um campo elétrico alternado. Expressas em porcentagem, as perdas estão relacionadas com a quantidade de energia dissipada pelo material sob a forma de calor. Em outras palavras, correspondem diretamente à corrente dissipada no óleo e, indiretamente, aos produtos polares e polarizáveis, partículas metálicas ou não-metálicas.

Para óleos em serviço, os valores obtidos têm um acréscimo gradativo ao longo do tempo, acompanhando a sua deterioração e a dos demais materiais. Assim, valores elevados (10 ou 12% a 100 °C, por exemplo), para equipamentos com muitos anos de operação não indicam, necessariamente, condições operacionais inadequadas. Os limites máximos permitidos para este parâmetro no recebimento correspondem a 0,05% a 25 °C e 0,50% a 100 °C e quando estão em uso são de aproximadamente 1,5% a 25 °C e 15% a 100 °C (GRANADO, 2001).

2.2.4 RIGIDEZ DIELÉTRICA

Mede a capacidade de um líquido isolante resistir ao impacto elétrico (diferença de tensão entre dois condutores) sem falhar. É expressa pela máxima tensão (em kV) aplicável, sem geração de descargas disruptivas (descarga do tipo arco, por exemplo) entre eletrodos que se acham submersos no óleo. O valor da rigidez dielétrica não é uma característica intrínseca do material, mas é uma medida indireta das impurezas contidas no líquido (água, fibras celulósicas, partículas) e o seu valor depende, ainda, do método de medida, isto é, da geometria e do afastamento dos eletrodos, da taxa de elevação de tensão, entre outros. Para óleos em serviço, é um indicativo da presença de água e de partículas sólidas, refletindo as condições de operação do equipamento. Seu monitoramento é muito importante para avaliar a função isolante do líquido.

Alguns exemplos de métodos de medições são o método das esferas e o método de discos. O primeiro é periférico em virtude de sua maior sensibilidade e é indicado para testes em óleos novos e de boa qualidade. O segundo é recomendado para óleos mais velhos e de qualidade inferior.

Os limites permitidos dependem do tipo de método utilizado. Para o método de disco, na etapa de recebimento, o limite é de 30 kV. Antes da colocação no transformador, o OMI é submetido a um tratamento tipo termo-vácuo que aumenta a rigidez dielétrica para aproximadamente 50 kV. Um valor referencial limite para OMI em uso é de, aproximadamente, 30 kV (GRANADO, 2001).

2.2.5 TEOR DE ÁGUA

O teor de água é a medida direta da quantidade de água presente no óleo isolante. A umidade pode afetar as características elétricas dos líquidos isolantes,

tornando-os impróprios para a utilização em equipamentos elétricos, bem como provocar a degradação do isolamento celulósico (papel, papelão, madeira). Dentre os métodos propostos para a determinação do teor de água de líquidos isolantes, o método atualmente reconhecido como mais adequado é o de Karl Fischer (MILASCH 1984).

O método consiste na oxidação do dióxido de enxofre (SO_2) pelo iodo em presença de água, da piridina e do álcool metílico. A oxidação do SO_2 se dará somente em presença de água. O método de titulação mais adequado é o amperimétrico com corrente sob tensão constante.

Considera-se como limite para uso contínuo do óleo isolante os índices de 39 ppm para equipamentos com classe de tensão igual ou inferior 69 kV, de 25 ppm para equipamentos com classe entre 69 kV e 238 kV, e de 20 ppm para equipamentos com classe de tensão de 238 kV ou superior.

2.2.6 TENSÃO INTERFACIAL

A tensão interfacial, expressa em mN/m ou dina/cm, é a força necessária para que um anel de platina rompa a interface água-óleo. Esta é uma medida indireta da concentração de compostos polares presentes no óleo (GRANADO, 2001). A presença de compostos como aldeídos, cetonas ou ácidos, os quais apresentam grande interação com a água, tende a diminuir a tensão na interface água-óleo.

O limite mínimo permitido para este parâmetro no recebimento do OMI novo é de 40 dina/cm a 25 °C e, quando está em uso, um valor referencial limite é de, aproximadamente, 18 dina/cm a 25 °C (GRANADO, 2001).

2.2.7 ÍNDICE DE NEUTRALIZAÇÃO

O índice de neutralização, ou o número de neutralização, é o número de miligramas de hidróxido de potássio (KOH) necessário para neutralizar um grama de óleo. Desta forma, o número total de ácido no óleo isolante é determinado dissolvendo-se certo volume de sua amostra em uma mistura de tolueno e álcool isopropílico e pequena quantidade de água. A solução resultante é titulada na temperatura ambiente com uma solução alcoólica de KOH (0,1 Normal) em presença do indicador p-naftolbenzeína, cuja cor se altera de alaranjado em meio ácido para verde em meio alcalino. O valor máximo recomendado é de 0,10 mgKOH/g.

2.3 ÍNDICE DE QUALIDADE DO SISTEMA (OQIN)

Por meio dos ensaios físico-químicos e cromatográficos, é possível identificar a qualidade do OMI. Um dos parâmetros para identificação da qualidade do OMI é o índice de qualidade do sistema (OQIN) ou número índice de Myers (MIN), que é calculado dividindo a tensão interfacial (IFT) pelo número de neutralização (NN). Um OMI de boa qualidade tem um OQIN de 1500. Na Tabela 2.4 tem-se a classificação do óleo conforme os parâmetros OQIN, IFT e NN (Gray).

Tabela 2.4 – Classificação do OMI.

NN	IFT	Cor	OQUIN	Classificação
0,00 – 0,10	30,0 – 45,0	Amarelo pálido	300 – 1500	Bom
0,11 – 0,15	24,0 – 27,0	Amarelo claro	160 – 318	Regular
0,16 – 0,40	18,0 – 23,9	Âmbar	45 – 159	Ruim
0,41 – 0,65	14,0 – 17,9	Marrom	22 – 44	Muito ruim
0,66 – 1,50	9,0 – 13,9	Marrom escuro	6 – 21	Extremamente ruim
1,50 ou mais		Preto		Condições desastrosas

Os três parâmetros de qualificação do OMI são: a capacidade de refrigeração, proteção contra ataques químicos e prevenção da formação de borra. A primeira categoria é OMI Bom, ou seja, todas as funções estão funcionando perfeitamente. Na segunda categoria, OMI Regular, o óleo não está promovendo a correta refrigeração do sistema nem uma correta proteção dos enrolamentos. Para as categorias 3, 4 e 5, borra se depositou em quase 100% das partes do transformador, comprometendo a isolação e reduzindo o resfriamento principalmente nas categorias Muito e Extremamente Ruins. Finalmente, na última categoria, o OMI perdeu todas suas propriedades. À medida que a coloração vai mudando de amarelo para marrom, o óleo vai perdendo suas propriedades de isolação, isso ocorre devido a formação de pontos quentes, sobre aquecimento, sobre-tensões e novo OMI em local contaminado. Na situação onde NN e IFT são ruins, porém, a coloração é amarela clara indica contaminação por produtos diferentes do oxigênio, ou seja, problemas no refinamento.

2.4 TRATAMENTOS EMPREGADOS NA RECUPERAÇÃO DO OMI EM USO

Conforme descrito anteriormente, quando o OMI perde suas propriedades dielétricas há duas formas para recuperá-lo – regeneração ou substituição. A ação tomada dependerá das propriedades físico-químicas do óleo.

A substituição do óleo é uma ação corretiva que se aplica quando o óleo apresenta baixa tensão interfacial (igual ou abaixo de 18 mN/m) e/ou elevado índice de acidez (0,15 mg KOH/g). Estes ensaios determinam se o óleo está oxidado (envelhecido) ou contaminado por compostos polares. Neste caso, o óleo envelhecido ou contaminado pode ser substituído por óleo novo ou regenerado, desde que este último apresente as características físico-químicas de óleo novo (Brastrafo do Brasil, 2004).

Uma forma de regeneração do óleo isolante é o tratamento termo-vácuo, que é uma ação corretiva aplicada quando o óleo apresenta elevado teor de água e/ou de partículas que causam diminuição de sua rigidez dielétrica. Com este tratamento, há elevação na rigidez dielétrica, uma vez que os contaminantes (água e partículas) são reduzidos a valores adequados (aproximadamente 40 kV ou acima), e também, redução no teor de gases dissolvidos (BRASTRAFO DO BRASIL, 2004).

Outros parâmetros que indicam que o óleo pode ser regenerado é a verificação da tensão interfacial e/ou índice de acidez. Quando o óleo apresenta baixa tensão interfacial (acima de 18 mN/m) e/ou elevado índice de acidez (0,15 mg KOH/g), o OMI pode ser regenerado. Um OMI regenerado apresenta, normalmente, tensão interfacial próxima ou igual a 40 mN/m e índice de acidez próximo ou igual a 0,03 mg KOH/g. Ou seja, após a regeneração o OMI recompõe as características de óleo novo (BRASTRAFO DO BRASIL, 2004). Neste processo, o óleo é percolado através de um agente adsorvente (bauxita, atapungita ou terra Fuller), no qual ficam retidos a maioria dos compostos polares, gerando, ao final, um óleo com características físico-químicas próximas das de um óleo novo, porém com um decréscimo na sua estabilidade à oxidação. Para aumentar a estabilidade à oxidação é adicionado o antioxidante sintético di-terc-butil-p-cresol (DBPC), normalmente na concentração de 0,3% (m/m). Após esta etapa o OMI é submetido ao condicionamento por termo-vácuo, para retirada de umidade e de gases (GRANADO, 2001). Em geral, o custo do OMI regenerado, comparativamente ao do OMI novo, é cerca de 50% inferior.

Além da regeneração do OMI, pode ser realizado o tratamento do núcleo do transformador, que contém basicamente cobre e papel. A secagem do núcleo (Hot Oil Spray) é uma ação corretiva que se aplica quando o papel do isolamento sólido do transformador está contaminado com elevado teor de água. Este tratamento é indicado para os casos onde o equipamento elétrico não pode ser deslocado para manutenção em fábrica (BRASTRAFO DO BRASIL, 2004).

2.5 ANÁLISES CROMATOGRÁFICAS DO ESTADO DO ÓLEO ISOLANTE

As análises cromatográficas, também conhecidas como análises de gases dissolvidos (DGA – do inglês *Dissolved Gas Analysis*) são ferramentas de diagnósticos para detecção e avaliação de falhas incipientes no OMI. Quando uma falha ocorre no transformador, o sistema de isolamento irá prover degradação química, no qual irá gerar a produção de vários gases que estarão dissolvidos no óleo. A concentração desses gases é relacionada a um tipo de falha no transformador.

Os principais gases analisados pelas DGA estão listados naTabela 2.5. Em operação normal, a presença desses gases no transformador é normal, ou seja, não indica a existência de falhas. A única exceção é o dióxido de carbono, ou seja, dos gases listados naTabela 2.5, o CO₂ é o gás que indica a ocorrência de uma falha junto ao equipamento.

Tabela 2.5– Gases Analisados pela DGA.

Hidrogênio	H ₂
Metano	CH ₄
Etano	C ₂ H ₆
Etileno	C ₂ H ₄
Acetileno	C ₂ H ₂
Monóxido de Carbono	CO
Dióxido de Carbono	CO ₂
Oxigênio	O ₂
Nitrogênio	N ₂

Um problema no transformador pode acarretar na variação da concentração padrão desses gases no óleo. O aumento na concentração dos gases no transformador indica a ocorrência de uma falha que resulta na saturação do óleo isolante (HOOSHMAND, BANEJAD, 2006). Com a saturação, o gás é liberado do óleo modificando as características do transformador. A quantidade de gás liberado depende da temperatura do óleo e do tipo de gás. A produção de gás pode ser classificada em três grupos: polarização, corona e arco. Essa classificação é baseada na severidade com que a energia é liberada durante a falha. A maior e menor quantidade de energia liberada é associada com o arco e corona respectivamente.

- ❖ Polarização: no óleo, os gases liberado em baixa temperatura são o metano e etileno e em alta temperatura são o metano, etileno, etano e hidrogênio. Na celulose, os gases

gerados tanto em alta quanto em baixa temperatura são o monóxido e dióxido de carbono.

- ❖ Corona: o gás produzido no óleo é o hidrogênio e os gases liberados pela celulose são o hidrogênio, o monóxido e o dióxido de carbono.
- ❖ Arco: neste caso, os gases liberados são: hidrogênio, metano, etano, etileno e acetileno.

Relacionados à temperatura, pesquisas laboratoriais mostram que os gases CO, CO₂, e a água se formam quando a celulose é sobreaquecida até a temperatura de 140°C. A pirólise, destruição por temperaturas superiores a 250°C, origina o gás CO em maior quantidade que o CO₂. Neste caso há também a formação de água, carvão e alcatrão. Em temperaturas superiores a 500°C, originam-se os gases metano, etano, etileno, CO₂ e água quando da presença de O₂.

Atualmente, os melhores métodos de análise de DGA são realizados em laboratório, pois há a presença de instrumentos com alto grau de precisão. O processo de análise pode ser resumido nas seguintes etapas:

- ❖ Envio da amostra de OMI;
- ❖ Extração dos gases através do OMI;
- ❖ Análise da mistura de gás extraída;
- ❖ Interpretação dos dados do gás.

O envio da amostra de óleo pode provocar imprecisões nos resultados da análise cromatográfica. É, portanto, fundamental que o óleo seja muito bem protegido quando coletado para análise. Para que a extração dos gases no OMI seja correta, é necessário que não haja bolhas no recipiente de coleta. Deve-se, então, aquecer levemente a amostra ou injetá-la em um aparelho desgaseificador. A amostra é submetida a vácuo e os gases são recolhidos numa bureta graduada que é levada ao cromatógrafo. O cromatógrafo é, basicamente, um aparelho utilizado na análise de substâncias por processo químico, capaz de separar os vários componentes da amostra.

Após a extração, os gases são separados e suas concentrações são determinadas. Com isso, a condição de operação do transformador é determinada identificando se há ou não alguma anomalia. Se houver algum problema através das análises

cromatográficas, pode-se prever as possíveis causas e assim tomar as devidas medidas de contenção (regeneração) ou reparação (substituição) do OMI.

2.6 DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Uma vez detectado que o transformador apresenta anomalias, é necessário classifica-las. As principais metodologias para o diagnóstico das falhas são:

- ❖ Métodos IEEE (Rogers, Dornenburg e Gás Chave);
- ❖ Relação dos códigos IEC;
- ❖ Triângulo de Duval.

O desempenho de cada um desses métodos está resumido na Figura 2.6. Uma desvantagem dos métodos (Rogers, Dornenburg e IEC) é que algumas análises cromatográficas podem resultar numa falha com valores fora do intervalo de códigos e, com isso, nenhum diagnóstico pode ser efetuado. A resposta do sistema diagnóstico é, portanto, sem solução. Isto não acontece com o método do triângulo por ser um sistema fechado enquanto que os outros são sistemas abertos (DUVAL, 2003).

Todos os métodos apresentam guia para interpretação da DGA. Nessas normas há interpretações gráficas e numéricas (em forma de tabelas) da típica concentração de gases imersos no transformador em operação. De acordo com as normas, as duas principais causas da formação de gases no transformador são:

- ❖ Falha Térmica: Conforme a norma IEC 60599 é ocasionada pela excessiva elevação de temperatura na isolação;
- ❖ Falha Elétrica: Também conforme a norma IEC 60599 é ocasionada por descargas parciais ou elétricas na isolação.

Tabela 2.6– Comparação entre metodologias para o diagnóstico de falhas.

Método	% de Diagnósticos sem Solução	% de Diagnósticos Errados	% Total
Gás Chave	0	58	58
Rogers	33	5	38
Dornenberg	26	3	29
IEC	15	8	23
Triângulo de Duval	0	4	4

2.6.1 MÉTODO DE ROGERS

Esse método é uma forma empírica para detecção de falhas, é baseada em resultados de três relações de gases:

$$\frac{CH_4}{H_2}, \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \text{ e } \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

A Tabela 2.7– Identificação de falhas por meio do Método de Rogers resume a classificação de falhas pelo método de Rogers. Recomenda-se o emprego de outro método de avaliação da concentração de gases em transformadores, para que possa comparar os resultados.

Tabela 2.7– Identificação de falhas por meio do Método de Rogers.

Falhas	Razões			
	CH_4 / H_2	C_2H_2 / C_2H_4	C_2H_6 / C_2H_2	C_2H_2 / CH_4
Normal	> 0,1 < 1,0	< 1,0	< 1,0	< 0,5
Descargas parciais do tipo corona	$\leq 0,1$	< 1,0	< 1,0	< 0,5
Descargas parciais corona com tracking	$\leq 0,1$	< 1,0	< 1,0	$\geq 0,5$ < 3,0 ou $\geq 3,0$
descarga contínua	> 0,1 < 1,0	< 1,0	$\geq 3,0$	$\geq 3,0$

Falhas	Razões			
	CH_4 / H_2	C_2H_2 / C_2H_4	C_2H_6 / C_2H_2	C_2H_2 / CH_4
Arco elétrico com grande dissipação de energia	$> 0,1$ $< 1,0$	$< 1,0$	$\geq 1,0$ $< 3,0$ ou $\geq 3,0$	$\geq 0,5$ $< 3,0$ ou $\geq 3,0$
Arco elétrico com pequena dissipação de energia	$> 0,1$ $< 1,0$	$< 1,0$	$< 1,0$	$\geq 0,5$ $< 3,0$
Superaquecimento para 150°	$\geq 1,0$ $< 3,0$ ou $\geq 3,0$	$< 1,0$	$< 1,0$	$< 0,5$
Superaquecimento 150 – 200°C	$\geq 1,0$ $< 3,0$ ou $\geq 3,0$	$\geq 1,0$	$< 1,0$	$< 0,5$
Superaquecimento 200 – 300°C	$> 0,1$ $< 1,0$	$\geq 1,0$	$< 1,0$	$< 0,5$
Aquecimento dos condutores dos enrolamentos	$> 0,1$ $< 1,0$	$< 1,0$	$\geq 1,0$ $< 3,0$	$< 0,5$
Circulação de corrente elétrica no núcleo ou no tanque	$\geq 1,0$ $< 3,0$	$< 1,0$	$\geq 3,0$	$< 0,5$

2.6.2 MÉTODO DE DORNENBURG

Assim como o Método de Rogers, o Método de Dornenburg é um método empírico, no qual se sugere a existência de três tipos de falhas: térmica, corona e formação de arcos (Norma IEEE C57.104-1991). Neste método, utilizam-se como referência para classificação das falhas as relações entre concentrações de gases específicos obtidos através da cromatografia gasosa. São elas:

$$\frac{CH_4}{H_2}, \frac{C_2H_2}{C_2H_4}, \frac{C_2H_6}{C_2H_2} \text{ e } \frac{C_2H_2}{CH_4}$$

A Tabela 2.8– Identificação de falhas através do Método de Dornenburg resume os

valores das razões com o tipo de falha associada. A Figura 2.5– Gráfico para Falha Incipiente, representa o surgimento de uma falha incipiente utilizando o método de Dornenburg. Lembrando que esse gráfico está em escala logarítmica.

Tabela 2.8– Identificação de falhas através do Método de Dornenburg.

Tipo de falha	Razões			
	CH_4 / H_2	$\text{C}_2\text{H}_2 / \text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6 / \text{C}_2\text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_2 / \text{CH}_4$
Decomposição térmica	> 1,0	< 0,75	> 0,4	< 0,3
Descargas elétricas	> 0,1 < 1,0	> 0,75	< 0,4	> 0,3
Corona	< 0,1	Insignificante	> 0,4	< 0,3

Figura 2.5– Gráfico para Falha Incipiente.

2.6.3 MÉTODO DO GÁS CHAVE

O Método do Gás Chave tem esse nome, pois associado a cada falha há um tipo de gás denominado gás chave. Esse método se baseia na evolução de uma falha no transformador, pois a concentração dos gases associadas à essa falha ultrapassarão os valores normais de degradação da isolação em relação aos estabelecidos em ensaio de laboratório. A Tabela 2.9 traz os perfis típicos, ou predominantes de comparação dos gases, esses valores são baseados na norma NBR 7274/1982 da ABNT. Para a falha de formação de arco, o

acetileno é o gás chave. Neste defeito, grandes quantidades de hidrogênio e acetileno são produzidas, com pequenas quantidades de metano e etileno. Caso a falha envolva a celulose, dióxido e monóxido de carbono também podem ser formados.

Tabela 2.9– Perfis típicos de comparação.

Falha	Gás chave
Arco	Acetileno
Descargas parciais	Hidrogênio
Óleo superaquecido	Etileno
Celulose superaquecido	Monóxido de carbono
Eletrólise	Hidrogênio

As descargas parciais de baixa energia produzem hidrogênio e metano, com pequenas quantidades de etano e etileno. Quantidades comparáveis de monóxido e dióxido de carbono podem resultar de descargas em celulose. O gás chave referente às descargas parciais é o hidrogênio.

O óleo superaquecido produz etileno e metano, juntamente com quantidades menores de hidrogênio e etano. Traços de acetileno podem ser formados se a falha é severa ou se esta envolver contatos elétricos. O gás chave referente ao superaquecimento do óleo é o etileno.

A celulose superaquecida libera grandes quantidades de dióxido e monóxido de carbono e caso a falha envolva uma estrutura impregnada de óleo formarão também metano e etileno. Neste caso o gás chave é o monóxido de carbono.

A decomposição eletrolítica da água ou a decomposição da água associada com a ferrugem resulta na formação de grandes quantidades de hidrogênio (gás chave), com pequenas quantidades dos outros gases combustíveis.

O método do gás chave, em geral, é empregado em situações onde se deseja obter um diagnóstico aproximado do estado do transformador, ou ainda em situações onde já exista uma estimativa do tipo de falha que está ocorrendo.

2.6.4 RELAÇÃO DOS CÓDIGOS IEC

Nas DGA, os códigos IEC foram estudados por décadas chegando à conclusão de que alguns tipos de gases, tais como o hidrogênio e metano, provocam descargas elétricas no OMI. Esses estudos foram aperfeiçoados quando certas relações de gases foram padronizadas. Com isso, em 1978, a IEC criou a Relação dos Códigos IEC, onde essas

relações foram classificadas e colocadas na Tabela 2.10. Códigos são então alocados de acordo com o valor obtido para cada relação e correspondendo assim a uma falha classificada conforme Tabela 2.11. Embora esse método seja útil para avaliação do isolamento no transformador, nenhuma indicação quantitativa de probabilidade de cada falha é dada. E em alguns casos, o resultado da DGA pode não se igualar aos códigos padrões, tornando esse método inútil. Em casos de falhas múltiplas, gases de diferentes falhas se misturam resultando em intervalos confusos, onde tornaria esse método obsoleto.

Tabela 2.10– Relação dos códigos IEC.

Regiões definidas para as razões	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
< 0,1	0	1	0
0,1 – 1	1	0	0
1 – 3	1	2	1
> 3	2	2	2

Tabela 2.11– Classificação da falha conforme relação de códigos IEC.

Nº	Tipo de Falha	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
0	Condição normal	0	0	0
1	Descargas parciais com baixa densidade energética	0 (mas não significativo)	1	0
2	Descargas parciais com alta densidade energética	1	1	0
3	Descargas parciais de baixa energia	1 ou 2	0	1 ou 2
4	Descargas parciais de alta energia	1	0	2
5	Falha de temperatura baixa < 150°C	0	0	1
6	Falha de temperatura baixa 150 – 300°C	0	2	0
7	Falha de temperatura média 300 – 700°C	0	2	1
8	Falha de temperatura alta > 700°C	0	2	2

2.6.5 TRIÂNGULO DE DUVAL

O Triângulo de Duval foi primeiramente desenvolvido em 1974 e é baseado na concentração de três gases hidrocarbonetos:

- ❖ Metano (CH₄);
- ❖ Etileno (C₂H₄);
- ❖ Acetileno (C₂H₂).

Esses três gases correspondem ao aumento de energia necessária para geração de gases nos transformadores em funcionamento. Tanto o etileno quanto o acetileno representam falhas relacionadas a altas temperaturas e altas energias (arcos); o hidrogênio representa falhas relacionada à baixa energia (descargas parciais) onde é produzido em grande quantidade e o metano também representa falhas de baixa energia, porém em menor quantidade que o hidrogênio.

O princípio de funcionamento do critério é melhor visualizado pela Figura 2.6, onde a evolução dos gases gerados é representada por um triângulo. As coordenadas são definidas pela relação percentual de cada um dos gases em relação ao total de gases gerados. O critério pode identificar três falhas de origem elétrica e três falhas de origem térmica.

Figura 2.6– O Triângulo de Duval.

O triângulo é dividido em sete zonas denominadas (PD, D1, D2, DT, T1, T2 e T3), onde cada zona está associada a um tipo de falha. A Figura 2.6 relaciona cada zona à sua respectiva falha. Os três lados do triângulo são representados por coordenadas triangulares (X,Y,Z) indicando a proporção relativa de 0 a 100% para o metano (CH₄), etileno (C₂H₄) e acetileno (C₂H₂).

Fazendo (CH₄) = A, (C₂H₄) = B e (C₂H₂) = C, todos em ppm, calcula-se a soma dos três gases: S = A + B + C, também expresso em ppm. Então se calcula o valor proporcional relativo dos gases, em porcentagem: X = % CH₄ = 100 (A/S), Y = % C₂H₄ = 100 (B/S), Z =

% $C_2H_2 = 100 (C/S)$. X, Y e Z estão necessariamente entre 0 e 100% e $(X + Y + Z)$ tem sempre que ser igual a 100%.

Plotando X, Y e Z no triângulo resulta em apenas um ponto no triângulo e o lugar (zona) onde esse ponto cair, corresponde a um tipo de falha conforme aTabela 2.12.

Tabela 2.12– Condições de falhas no Triângulo de Duval.

Símbolo	Falhas	Exemplos
PD	Descargas Parciais	Descargas parciais tipo corona
T1	Falha térmica em baixa temperatura: $T < 300^{\circ}C$	Papel mudando coloração para acastanhado quando $T > 200^{\circ}C$ e carbonizado quando $T > 300^{\circ}C$
T2	Falha térmica em média temperatura: $300 < T < 700^{\circ}C$	Carbonização do papel, formando partículas de carbono no óleo
T3	Falha térmica em alta temperatura: $T > 700^{\circ}C$	Excessiva formação de formando partículas de carbono no óleo, tornando-o com coloração metálica em $T = 800^{\circ}C$ e fundindo-o com $T > 1000^{\circ}C$
D1	Descargas de baixa energia	Descargas parciais tipo arco, induzindo à carbonização do OMI
D2	Descargas de alta energia	Descargas no papel e no óleo com poder atravessador, resultando num extensivo dano ao papel ou formação de partículas de carbono no óleo chegando a fundi-lo
DT	Mistura de falhas	Mistura de falhas elétricas e térmicas no transformador

Capítulo 3. AJUSTE AUTOMÁTICO DE SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY

3.1 INTRODUÇÃO

A lógica fuzzy é a lógica que suporta os modos de raciocínio que são aproximados ao invés de exatos, ou ainda, de forma mais abrangente, pode ser aceita como a melhor maneira de representação do raciocínio humano, que é parcial e aproximado em sua essência.

Modelagem e controle fuzzy de sistemas são técnicas para o tratamento de informações qualitativas de uma forma rigorosa. Derivada do conceito de conjuntos fuzzy, a lógica fuzzy constitui a base para o desenvolvimento de métodos e algoritmos de modelagem e controle de processos, permitindo a redução da complexidade de projeto e implementação, tornando-se uma alternativa para a solução de problemas de controle e modelagem de sistemas.

Esta forma de estruturação do raciocínio é capaz de tomar decisões racionais mesmo estando em um ambiente de incertezas e imprecisões, onde dados desta natureza e até mesmo conflitantes são tratados (LEE, 1990). A tecnologia advinda da teoria de conjuntos fuzzy e da lógica fuzzy tem permitido a aplicação destas técnicas em diversas áreas do conhecimento (GOMIDE & GUDWIN, 1994; HIROTA, 1994), tendo como exemplos os sistemas fuzzy de controle, os quais podem possibilitar um controle mais acurado, além de um desempenho estável e robusto; ou ainda, na modelagem de sistemas, onde através das técnicas de sistemas de inferência fuzzy é possível uma representação mais fiel do mesmo e inclusive a extração de informações qualitativas deste.

Como mencionado anteriormente, a lógica fuzzy procura expressar o raciocínio aproximado, ou seja, através da representação do conhecimento por regras se pode responder a um determinado estímulo. Na lógica fuzzy existe a opção adicional de se empregar possibilidades linguísticas, como por exemplo “provável”, “altamente provável” e

“improvável”, interpretados como números fuzzy e manipulados pela aritmética fuzzy. Também em contraste com a lógica modal clássica, o conceito de possibilidade é interpretado utilizando os subconjuntos fuzzy no universo dos reais.

Através da lógica fuzzy, um sistema pode ser representado através de conceitos imprecisos tais como “rápido”, “baixo” e “pequeno”. Essas propriedades são responsáveis, entre outras, pela facilidade na extração do conhecimento de um sistema a partir de observações realizadas sobre este.

Em um sistema de inferência fuzzy, os valores de entrada são normalizados e convertidos para uma representação fuzzy. Este processo é denominado de fuzzificação das variáveis de entrada. As regras do sistema fuzzy serão executadas em paralelo, consequentemente, uma região fuzzy será produzida para cada variável. A criação desta região fuzzy através das regras ativas do sistema é conhecida por agregação. Depois do processamento das regras de inferência, as regiões fuzzy são convertidas em valores não fuzzy, também conhecidas como valores “crisp”, determinando assim, o valor de cada variável de saída do sistema. O processo de se converter tal região fuzzy em um valor real é conhecido por defuzzificação.

Um sistema de inferência fuzzy dedicado a uma determinada aplicação necessita, na sua fase de desenvolvimento, da especificação de alguns parâmetros. Dentre os parâmetros relacionados à sua estrutura se pode citar o número de funções de pertinência para cada entrada e para cada saída, o número de regras, bem como a definição de cada uma das regras. A determinação destes parâmetros pode ser realizada por meio de associações empíricas ou através da experiência prática. No entanto, muitos processos não fornecem subsídios adequados à determinação correta dos parâmetros estruturais do sistema fuzzy.

Torna-se então necessário o desenvolvimento de técnicas de sintonia que sejam eficientes na otimização estrutural e paramétrica de sistemas fuzzy. Dessa maneira, esse capítulo está organizado de maneira a contemplar os fundamentos elementares correlatos aos sistemas fuzzy na Seção 3.2. Na Seção 3.3 será dado destaque às principais técnicas de ajuste de sistemas de inferência fuzzy. A fim de delinear corretamente os aspectos propostos, tanto para o ajuste estrutural como para o ajuste paramétrico de sistemas fuzzy, torna-se necessária a apresentação do modelo de sistema fuzzy adotado nesse trabalho, aspecto esse abordado na Seção 3.4. O algoritmo para o ajuste estrutural é delineado na Seção 3.5, tal como a Seção 3.6 conduz à formulação do algoritmo para o ajuste paramétrico. Por fim, na Seção 3.7, algumas considerações sobre a técnica proposta são tecidas.

3.2 FUNDAMENTOS SOBRE CONJUNTOS E LÓGICA FUZZY

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos relacionados aos conjuntos e à lógica fuzzy, tendo como foco a modelagem de sistemas. Apesar de existir uma complexa base formal sustentando seu uso na modelagem e controle de sistemas, serão evidenciados somente os fundamentos necessários para o entendimento da teoria básica de modelagem fuzzy.

Assim, na teoria clássica de conjuntos, um elemento pertence a uma classe ou não. Dado um universo de discurso U e um elemento particular $x \in U$, o grau de pertinência $\mu_A(x)$ com relação a um conjunto $A \subseteq U$ é dado por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

A função $\mu_A(x): U \rightarrow \{0, 1\}$ é chamada de função característica na teoria clássica de conjuntos. Pode-se observar através de (3.1) que a função característica, assim definida, pode assumir apenas valores discretos.

Frequentemente, uma generalização desta ideia é utilizada, por exemplo, para manipulação de dados com erros limitados. Todos os números pertencentes a um intervalo pré-definido terão um grau de pertinência 1, os números que não pertencerem a este intervalo possuirão um grau de pertinência nulo como pode ser observado na Figura 3.1(a). Na Figura 3.1(b) o caso preciso é apresentado e deste se tem que o grau de pertinência é um somente em determinado valor, sendo nulo para os demais valores.

Zadeh (1973) propôs uma caracterização mais ampla, na medida em que sugere que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. O grau de pertinência pode então assumir qualquer valor entre o intervalo $[0, 1]$, sendo que o valor 0 indica uma completa exclusão e um valor 1 representa completa pertinência, ou seja, a função característica passa a ser contínua no seu domínio. Esta generalização aumenta o poder de expressão da função característica. Na Figura 3.1(c), esta abordagem descrita é apresentada na forma de uma função de pertinência triangular com pico em x , sugerindo a ideia de que quanto mais próximo de x , mais o elemento se identifica com o conceito representado por x .

Figura 3.1 – Funções de pertinência.

A partir desta definição, o conceito de elemento e o conceito de conjunto podem ser expandidos e novas denominações mais amplas assumidas, como apresentado a seguir.

Formalmente, seja U uma coleção de objetos denominados genericamente por $\{u\}$. O domínio U é chamado de universo de discurso, podendo ser contínuo ou discreto. Um conjunto fuzzy A em um universo de discurso U é definido por uma função de pertinência μ_A que assume valores em um intervalo $[0, 1]$, como apresentado em expressão (3.2).

$$\mu_A : U \rightarrow [0,1] \quad (3.2)$$

O conjunto suporte de um conjunto fuzzy A é o sub-conjunto dos pontos u de U tal que $\mu_A(u) > 0$. Um conjunto fuzzy cujo conjunto suporte é um único ponto de U com $\mu_A=1$ é chamado de um conjunto unitário fuzzy. A partir desta definição, os conjuntos clássicos passam a ser um caso específico na teoria de conjuntos fuzzy. Na Figura 1.1(c) tem-se uma função de pertinência do tipo triangular, no entanto, pode-se utilizar qualquer função $f(x) \rightarrow [0,1]$ para a representação de um determinado conjunto fuzzy.

3.3 DEFINIÇÃO DE OPERAÇÕES E OPERADORES DA LÓGICA FUZZY

Sejam A e B dois conjuntos fuzzy definidos em um universo de discurso U com funções de pertinência μ_A e μ_B , respectivamente. As operações envolvendo conjuntos fuzzy,

tais como a união ($A \cup B$), a intersecção ($A \cap B$) e o complemento ($\neg A$) são definidas respectivamente de maneira formal pelas expressões (3.3) e (3.4).

$$\mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) \& \mu_B(u) \quad (3.3)$$

$$\mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \Gamma \mu_B(u) \quad (3.4)$$

$$\mu_{\neg A}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (3.5)$$

onde Γ é uma norma triangular (t-norma) e $\&$ é uma co-norma triangular (s-norma).

Como exemplo de s-norma tem-se a Expressão (3.6) e como exemplo da t-norma tem-se a Expressão (3.7).

$$\mu_{A \cup B} = \max \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \} \quad (3.6)$$

$$\mu_{A \cap B} = \min \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \} \quad (3.7)$$

O emprego do operador “max” representando a s-norma e o emprego do operador “min” representando a t-norma foi proposto inicialmente por Zadeh (1965). No entanto, inúmeras outras s-norma e t-norma podem ser empregadas na definição dos sistemas fuzzy (PEDRYCZ & GOMIDE, 1998).

3.3.1 Regras de Inferência Fuzzy

Para expressar conceitos ou relacionamentos através de elementos da linguagem natural é muito comum o uso de elementos qualitativos ao invés de valores quantitativos. Elementos linguísticos típicos incluem expressões do tipo “mais ou menos”, “alto”, “não muitos”, “médios”, etc. Estas ideias são capturadas pela definição de variáveis linguísticas. Uma variável linguística tem por característica assumir valores dentro de um conjunto de termos linguísticos, ou seja, palavras ou frases. Assim, ao invés de assumir instâncias numéricas, estas variáveis assumem instâncias linguísticas. Por exemplo, uma variável linguística “Temperatura” poderá assumir como valor um dos termos do conjunto {“baixa”, “média”, “alta”}. Para se atribuir um significado aos termos linguísticos, associa-se a cada um destes termos um conjunto fuzzy definido sobre um universo de discurso comum, que neste exemplo será a “Temperatura”. A Figura 3.2 ilustra três possíveis termos linguísticos para variável linguística representando a temperatura.

Figura 3.2 – Representação da variável linguística temperatura.

A forma mais comum de expressar o conhecimento é por meio de regras do tipo condição–ação. Neste tipo de regra, um conjunto de condições descrevendo uma parcela observável das entradas do processo é associado com uma ação de saída que irá manter ou levar o sistema às condições desejadas, ou ainda, expressar o conhecimento especialista envolvido em um sistema e permitir que a modelagem seja mais flexível e comporte informações qualitativas do processo.

Tipicamente, uma condição é uma proposição linguística (envolvendo variáveis linguísticas) sobre o valor de alguma das variáveis de entrada, como por exemplo “o erro é grande e positivo”. Da mesma maneira, uma ação típica de controle é uma descrição linguística, como por exemplo “aumente um pouco a vazão”. A ideia embutida junto às regras fuzzy de representar o conhecimento por meio de um conjunto de termos linguísticos associados às variáveis de saída e entrada do processo é absorvida pelos sistemas de inferência fuzzy. As ações de controle ou as saídas do modelo são expressas de forma similar para cada variável de controle (saídas). Regras do tipo se–então são frequentemente chamadas de declarações condicionais fuzzy ou simplesmente regras fuzzy. Dependendo do propósito, controle ou modelagem, podem ser chamadas ainda de regras de controle fuzzy ou regras de modelagem fuzzy. Uma regra fuzzy típica pode ser dada por:

$$\mu_{R_i} = \mu_{(A_i \text{ and } B_i \rightarrow C_i)}(u, v, w) \quad (3.8)$$

$$\mu_{R_i} = [\mu_{A_i}(u) \text{ and } \mu_{B_i}(v)] \rightarrow \mu_{C_i}(w) \quad (3.9)$$

onde A_i , B_i e C_i são conjuntos fuzzy pertencentes respectivamente aos universos de discursos U , V e W , e o operador ($\rightarrow$) denota uma função de implicação fuzzy.

Utilizando a regra de inferência composicional de Zadeh (ZADEH, 1973) para uma relação do tipo $RA \rightarrow B$, onde $A \in U$ e $B \in V$, e dado um conjunto fuzzy de U denotado por A' e um conjunto fuzzy B' de V , a inferência de A' é dada pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_{B'}(v) = \max_u \{ \min(\mu_{A'}(u), \mu_R(u, v)) \}; u \in U, v \in V \quad (3.10)$$

A ação de controle consistirá então da união de todas as funções fuzzy ativadas. O valor final, ou seja, aquele que será apresentado pelas saídas do sistema fuzzy, será determinado pelo processo de defuzzificação. Uma descrição detalhada dos processos envolvidos com a inferência fuzzy pode ser encontrada em Pedrycz & Gomide (1998).

3.3.2 Agregação

Em uma base de regras, quando mais de uma regra é acionada, as contribuições das diversas regras após a inferência são combinadas pelo operador de agregação. Por exemplo, supondo-se que $B'_1, \dots, B'_n$ são todos os resultados derivados das diversas regras acionadas, todos relacionados a uma mesma variável linguística, o resultado da implicação de todas as regras B' será:

$$B' = \bigcup_i^n B'_i \quad (3.11)$$

onde o símbolo $\bigcup$ representa o operador agregação. Um exemplo de função para o operador agregação é o operador união.

A Figura 3.3 ilustra o processo de inferência max–min quando existem duas regras, $A_i \rightarrow B_i$ e $A_j \rightarrow B_j$. A' é o fato de entrada, representado como um conjunto fuzzy.

Figura 3.3 – Mecanismo de inferência fuzzy.

3.4 Técnicas Para o Ajuste Estrutural e Paramétrico de Sistemas de Inferência Fuzzy

Nos últimos anos se pôde observar um grande e crescente interesse nas aplicações envolvendo lógica fuzzy. As aplicações envolvendo lógica fuzzy estão compreendidas desde produtos ao consumidor, tais como câmeras fotográficas, filmadoras, máquinas de lavar e fornos de microondas, até aplicações industriais como controle de processos, instrumentação médica e sistemas de suporte à decisão (RAMOT et al, 2003).

Dentro da teoria compreendida pela lógica fuzzy e da teoria associada aos conjuntos fuzzy, uma das implementações mais usuais e que mais se destacam são os sistemas de inferência fuzzy (GUILLAUME, 2001). Os sistemas de inferência fuzzy desempenham grande importância em tarefas como nas de reconhecimento de padrões, nas simulações e diagnósticos de processos, identificação de sistemas, etc.

De uma maneira geral, os sistemas de inferência fuzzy possuem propriedades peculiares que os tornam atrativos em diversas aplicações como exposto anteriormente. Além de serem capazes de incorporar conceitos linguísticos, os sistemas de inferência fuzzy são também aproximadores universais, capazes de mapearem as relações entre as entradas e saídas de um dado sistema.

Estas duas propriedades podem ser empregadas para designarem dois tipos principais de sistemas de inferência fuzzy (GUILLAUME, 2001).

O primeiro tipo de sistema de inferência fuzzy possui seu foco direcionado para a habilidade de modelar a linguagem natural, inerente à lógica fuzzy (MAMDANI & ASSILIAN, 1975). Este tipo de sistema de inferência contém regras fuzzy definidas a partir de uma base de conhecimento especialista. Tais sistemas são conhecidos como sistemas fuzzy especialistas ou controladores fuzzy, dependendo se a finalidade for modelagem ou controle, respectivamente.

O emprego deste primeiro tipo de sistema de inferência fuzzy, devido à sua estruturação, vem a oferecer uma robustez adequada aos propósitos desejados, pois os mesmos permitem a incorporação gradual de regras à sua base de conhecimento sem que haja perda ou inconsistência no resultado final (GUILLAUME, 2001).

Ainda com relação a este tipo de sistema fuzzy, pode-se observar que estes oferecem um alto nível semântico e uma boa capacidade de generalização. Porém, a complexidade de sistemas de médio até grande porte pode acarretar em uma insuficiência de precisão nos resultados de simulação, acarretando assim em um pobre desempenho (GUILLAUME, 2001).

Um outro tipo de sistema de inferência fuzzy pode ser identificado como sendo aqueles que incorporam o aprendizado através de um conjunto de dados onde estão paralelizadas as variáveis de entrada com suas respectivas saídas. Desta forma, pode-se observar que este segundo tipo de sistema de inferência fuzzy é definido com base nos dados coletados do sistema ao qual se deseja modelar; diferenciando-se do primeiro tipo, onde o sistema fuzzy era definido se relacionando o conhecimento especialista adquirido pela observação do sistema.

Takagi & Sugeno (1985) foram um dos primeiros pesquisadores a proporem estruturas de sistemas de inferência fuzzy próprio à agregação de algoritmos de sintonia, ou seja, sistemas de inferência fuzzy baseado em um conjunto de padrões de ajuste para a sua definição.

De uma forma genérica, esses métodos de ajuste de sistemas de inferência fuzzy podem ser interpretados como sendo compostos de técnicas de geração de regras através dos dados disponíveis para o ajuste (ou treinamento) e de técnicas dedicadas ao ajuste dos parâmetros livres do sistema fuzzy.

O processo de geração das regras de inferência pode ser decomposto em dois passos principais:

- ❖ Indução das regras.
- ❖ Otimização da base de regras.

Em pequenos sistemas, praticamente não existe a necessidade de se otimizar a base de regras induzidas no primeiro passo, pois esta possui um tamanho reduzido devido às próprias características do sistema. Em sistemas mais complexos, a otimização da base de regras induzidas se faz necessária, pois a base de regras se torna muito grande e a descrição de cada uma das regras é muito complexa devido ao número de variáveis. Desta forma, a interpretabilidade das regras pode ficar comprometida (GUILLAUME, 2001).

A fim de contornar o problema da interpretabilidade das regras, procura-se referenciar as regras em função das variáveis mais ponderantes, assim, o conhecimento armazenado no sistema poderá ser mais bem compreendido e o número de regras se tornará menor.

Pode-se observar que a indução de regras e a respectiva redução da base de regras são, assim, dois importantes passos no processo de geração das regras. A agregação destes dois processos é usualmente referenciada como otimização estrutural do sistema fuzzy.

Além da otimização estrutural, um sistema de inferência fuzzy possui muitos outros parâmetros que podem ser otimizados como, por exemplo, os parâmetros das funções de inferência e a ponderação de cada regra fuzzy. Este processo de otimização é conhecido como otimização paramétrica do sistema de inferência fuzzy.

A otimização paramétrica de sistemas de inferência fuzzy é objetivo de estudo de diversos autores como pode ser observado em Roger Jang et al. (1997) e Glorennec (1999).

Com relação à otimização estrutural se pode mencionar que existam dois tipos de métodos para a indução de regras. O primeiro tipo utiliza o particionamento do espaço multidimensional. O particionamento pode ser realizado baseado nos dados disponíveis, ou, definidos pelo conhecimento especialista. O processo de particionamento implica na definição do número de conjuntos fuzzy para cada variável do sistema e pressupõe que estas serão compartilhadas por todas as regras. O objetivo, neste caso, da técnica de ajuste é de otimizar a estrutura de particionamento.

A segunda família de métodos para a indução de regras é conhecida como clustering. Nestes métodos, os pares de dados (entradas – saídas) são reunidos em grupos homogêneos e existe uma regra associada a cada grupo. Nestes métodos os conjuntos fuzzy

não são compartilhados por todas as regras, mas sim, cada um destes conjuntos fuzzy é associado a uma regra em específico.

Ainda com relação a estes métodos, pode-se citar uma outra família denominada de métodos híbridos. Tem-se nestes métodos o intenso uso de técnicas computacionais, principalmente envolvendo outras abordagens da inteligência computacional; além disso, são mais heterogêneos do que os demais e seus resultados são altamente dependentes da implementação e da codificação empregada.

Dentro da primeira família de métodos para indução de regras em sistemas fuzzy é conveniente mencionar os principais. Desta forma, tem-se:

❖ **IMPLEMENTAÇÃO DE TODAS AS REGRAS.** Em Ishibuchi *et al.* (1994), um sistema de inferência fuzzy com múltiplas entradas e uma única saída é considerado. As regras são inferidas considerando todas as combinações possíveis dos conjuntos fuzzy de cada entrada. Trabalhos como o de Nozaki *et al.* (1997) propõe formas para o cálculo da ponderação das regras utilizando técnicas heurísticas. A partir desta abordagem, pôde-se evidenciar que, dentro da base de regras do sistema de inferência fuzzy, existiriam regras que nunca seriam ativadas pelos padrões de ajuste disponíveis.

❖ **NÚMERO DE CONJUNTOS FUZZY DINAMICAMENTE ESCOLHIDOS.** A escolha do número de conjuntos fuzzy associados a cada variável do sistema acarreta em consequências significantes. Se este número for muito pequeno, o sistema não será capaz de mapear o relacionamento implícito, acarretando em perda de precisão. Por outro lado, torna-se complicado aumentar o número de conjuntos fuzzy devido às seguintes razões: 1) Se este número for muito grande, os conjuntos fuzzy tendem a ser muito específico, resultando em uma perda da generalização; 2) À medida que se incrementa o número de conjuntos fuzzy, o número de regras tende a ser muito grande (GUILLAUME, 2001). Para evitar o uso de um número fixo de conjuntos fuzzy, alguns autores propõem metodologias para extração do número de conjuntos fuzzy a partir dos dados disponíveis para o ajuste. Dentre estes métodos, pode-se destacar:

❖ **REFINO DO PARTICIONAMENTO.** Dado um sistema de inferência fuzzy, inicialmente se atribui a cada uma de suas variáveis dois conjuntos fuzzy. A cada interação, um novo conjunto fuzzy é adicionado na entrada que é responsável pela maior parte do erro. Maiores detalhes sobre esta técnica podem ser encontrados em Bortolet (1998).

❖ **USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS.** Em Ishibuchi *et al.* (1995), problemas de classificação são tratados. Para atingir esses objetivos, diferentes partições fuzzy são geradas. Algoritmos genéticos são utilizados para selecionar o melhor particionamento de acordo com os dados disponíveis. Todas as regras correspondentes a um dado particionamento são consideradas. A função objetivo do algoritmo genético leva em consideração tanto o desempenho do sistema como a dimensão da base de regras.

❖ **UMA ÚNICA REGRA POR PAR DE DADOS.** Este método foi introduzido por Wang & Mendel (1992), no qual o número de regras é limitado ao número de padrões de treinamento. Esta metodologia independe do nível de particionamento, e a mesma agrega características adaptativas ao sistema, visto que as regras competem entre si.

❖ **ÁRVORES DE DECISÃO.** As árvores de decisão foram propostas por Quinlan (1986) e metodologias alternativas para a sua implementação também podem ser encontradas em Ichihashi *et al.* (1996). O objetivo desta técnica é de encontrar caminhos que levem a níveis puros, ou seja, regras com o mínimo de antecedentes, de tal forma que regras incompletas possam ser geradas. A árvore de decisão vem a representar o subespaço de todas as regras possíveis.

Dentre a segunda família de métodos para a indução de regras, os seguintes métodos podem ser destacados:

❖ **FUZZY C-MEANS CLUSTERING.** Este método foi introduzido por Dunn (1973). Bezdek demonstrou suas propriedades e a proposição do primeiro critério para a sua validação (RUNKLER & BEZDEK, 1999). A aplicação desta técnica possui diferentes implementações como aquelas propostas em Sugeno & Yasukawa (1993) e em Emami *et al.* (1998), onde a categorização é realizada no espaço das variáveis de saída. As premissas das regras, neste caso, são definidas pelas projeções dos clusters no espaço de entrada (GUILLAUME, 2001).

❖ **CLUSTER VALIDITY.** Desde os primeiros trabalhos de Bezdek, muitos grupos de pesquisadores estão envolvidos em pesquisas cujo foco se concentra em encontrar o número ótimo de conjuntos fuzzy. Este problema também é conhecido como problema da validação categorizada. Como exemplos de trabalhos realizados nesta área, pode-se citar o de Xie & Beni (1991), Emani *et al.* (1998), Yager & Filev (1994), Chiu (1994) e mais ainda Burrough (2000).

Como mencionado anteriormente, o conjunto de métodos classificados como métodos híbridos procura integrar entre si muitas ferramentas diferentes. Dentre estas

ferramentas, as que mais se têm destacados são os algoritmos genéticos e as redes neurais artificiais.

Dentre as principais abordagens que usam métodos híbridos neuro-fuzzy destaca-se o algoritmo ANFIS (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems) proposto por Roger Jang (1993). Tal algoritmo de sintonia é aplicável a arquiteturas fuzzy que possuem funções reais polinomiais como consequentes das regras fuzzy. Como exemplo deste tipo de arquitetura, destaca-se aquela proposta em Takagi & Sugeno (1985) e em Sugeno & Kang (1988). No entanto, a representação de um processo através destas arquiteturas acarreta na perda de interpretabilidade junto à base de regras criadas, uma vez que os membros consequentes serão expressos, não por variáveis linguísticas, mas sim por funções polinomiais conforme descrito anteriormente.

Torna-se assim interessante o desenvolvimento de algoritmos de ajuste de sistemas de inferência fuzzy baseados em arquiteturas Mamdani, nos quais os membros consequentes das regras fuzzy sejam representados por uma variável linguística. A abordagem fuzzy multicamadas proposta neste trabalho foi desenvolvida com o intuito de atender a este quesito.

3.5 MODELO DO SISTEMA FUZZY MULTICAMADAS

Os sistemas de inferência fuzzy podem ser tratados como sistemas que empregam os conceitos e operações definidas pela teoria de conjuntos fuzzy, bem como fazem uso do processo de inferência fuzzy a fim de desempenhar suas funções operacionais. Basicamente, estas funções operacionais compreendem a fuzzificação das entradas do sistema, a inferência das regras associadas ao mesmo, a agregação das regras e a posterior defuzzificação do resultado da agregação, na qual vem a ser a saída, ou saídas, do sistema fuzzy.

Pode-se observar com isso, que os sistemas de inferência fuzzy possuem funções distintas e claramente definidas. Assim, pode-se interpretar tais sistemas através da representação por um modelo multicamadas.

Tendo em vista as funções operacionais desempenhadas pelos sistemas de inferência fuzzy, é conveniente a representação dos mesmos por um modelo de três camadas. Logo, o sistema de inferência fuzzy proposto neste trabalho pode ser dado pela composição

sequencial da camada de entrada, da camada de inferência das regras fuzzy e da camada de saída.

A camada de entrada tem por funcionalidade a conexão às variáveis de entrada (advindas do meio externo), com o sistema de inferência fuzzy, bem como a fuzzificação dessas utilizando para isso as funções de pertinência associadas a cada entrada.

Na camada de inferência das regras fuzzy, ou simplesmente camada de inferência, as variáveis de entrada fuzzificadas são combinadas entre si, segundo as regras definidas, utilizando como suporte as operações definidas na teoria de conjuntos fuzzy.

Os resultados de cada regra individual são agregados, segundo algum método específico, compondo desta maneira o conjunto fuzzy de saída. Esse conjunto então é defuzzificado resultando na saída do sistema de inferência fuzzy. O processo de agregação e o processo de defuzzificação do conjunto fuzzy de saída são executados pela camada de saída. É importante observar, com relação à camada de saída, que apesar desta executar os dois processos acima descritos, ela é responsável também por armazenar as funções de pertinência das variáveis de saída.

Nas subseções que seguem, são apresentados mais detalhes das três camadas envolvidas com o sistema fuzzy multicamadas proposto.

3.5.1 Camada de Entrada

Como apresentado anteriormente, a camada de entrada do sistema de inferência fuzzy tem por finalidade a conexão das entradas advindas do mundo real com o sistema fuzzy, bem como a fuzzificação destas entradas segundo as funções de pertinência associadas ao sistema fuzzy.

A fuzzificação das entradas do sistema tem por finalidade a determinação do grau de pertinência de cada entrada em relação aos conjuntos fuzzy associados a cada variável de entrada. A cada variável de entrada do sistema fuzzy podem estar associados tantos conjuntos fuzzy quanto necessários. Desta forma, dado um sistema fuzzy com uma única entrada e, a esta entrada, associadas N funções de pertinência, ou seja, N conjuntos fuzzy que definem a referida entrada, a saída da camada de entrada será um vetor coluna com N elementos representando os graus de pertinência da entrada em relação a estes conjuntos fuzzy.

Se for definida a entrada deste sistema fuzzy, de uma única entrada, pelo escalar x , a saída da camada de entrada do sistema fuzzy será o vetor Y , ou seja:

$$Y(x) = p(x) = \begin{bmatrix} p_1(x) \\ p_2(x) \\ \vdots \\ p_N(x) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

onde $p_k(.)$ representa a função de pertinência definida para a entrada x referente ao k -ésimo conjunto fuzzy associado a esta entrada.

A generalização do conceito de camada de entrada para um sistema fuzzy possuindo m variáveis de entrada é realizada se cada uma dessas entradas do sistema fuzzy for modelada como uma subcamada da camada de entrada. Assim, o vetor de saída da camada de entrada $Y(x)$ pode ser dado como apresentado em(3.12), ou seja:

$$Y(x) = \begin{bmatrix} Y^{(1)} \\ Y^{(2)} \\ \vdots \\ Y^{(m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p^{(1)}(x_1) \\ p^{(2)}(x_2) \\ \vdots \\ p^{(m)}(x_m) \end{bmatrix}$$

onde x_i é a i -ésima entrada do sistema fuzzy, $p^{(k)}(.)$ é o k -ésimo vetor de função de inferência fuzzy associado à entrada x_k e $Y^{(k)}$. Cada subcamada possui seus conjuntos fuzzy definidos pelo vetor de funções de inferência fuzzy $p^{(k)}(.)$.

Portanto, o vetor $Y(x)$ dado em (3.11) passa a ser definido como a concatenação vetorial dos vetores $Y^{(1)}$, $Y^{(2)}$, ..., $Y^{(m)}$. Para um sistema constituído de duas variáveis de entrada, a expressão (3.10) seria dada por:

$$Y(x) = [\underbrace{p_1^{(1)}(x_1) \ p_2^{(1)}(x_1) \ \cdots \ p_N^{(1)}(x_1)}_{p^{(1)}(x_1)} \mid \underbrace{p_1^{(2)}(x_2) \ p_2^{(2)}(x_2) \ \cdots \ p_N^{(2)}(x_2)}_{p^{(2)}(x_2)}]^T \quad (3.13)$$

Como exemplo, a Figura 3.4 ilustra os conjuntos fuzzy associados a um sistema de duas entradas, x_1 e x_2 , com três conjuntos fuzzy em cada uma.

Figura 3.4 – Representação das entradas do sistema fuzzy multicamadas.

Como mencionado anteriormente, as funções de pertinência têm a propriedade de definirem os conjuntos fuzzy associados à cada entrada. Na camada de entrada, são as funções de pertinência que determinam o grau de pertinência de cada variável em relação ao conjunto fuzzy que essas definem.

As funções de pertinência podem ser definidas através de qualquer função. O único requisito para tais funções é que as mesmas estejam definidas no domínio fechado $[0,1]$. Porém, é desejável que as funções de pertinência sejam definidas de forma simples e convenientemente para a respectiva implementação computacional, tendo como objetivo uma maior velocidade de processamento e uso racional de memória.

3.5.2 CAMADA DE INFERÊNCIA

A camada de inferência de um sistema fuzzy tem por funcionalidade o processamento das regras de inferência fuzzy definidas para o mesmo. Outra funcionalidade da camada de inferência é de proporcionar uma base de conhecimento sobre o processo em questão. Da mesma forma como as subcamadas da camada de entrada, as regras de inferência são processadas de forma conjunta.

Dentro deste contexto, a definição deste conjunto de regras é de fundamental importância para o correto funcionamento do sistema de inferência fuzzy. Diversos são os métodos para extração das regras fuzzy a partir do conjunto de dados de ajuste.

A ponderação das regras de inferência é uma forma adequada de representar no sistema fuzzy as regras mais importantes ou mesmo permitir que regras conflitantes se relacionem sem que haja perda de completude verbal das regras.

Desta forma, pode-se expressar a i -ésima regra fuzzy como em(3.13), ou seja:

$$R_i(Y(x)) = w_i r_i(Y(x)) \quad (3.14)$$

onde $R_i(.)$ é a função que representa o valor ponderado da i -ésima regra fuzzy, w_i é o fator de ponderação da i -ésima regra fuzzy e $r_i(.)$ representa o valor fuzzy da i -ésima regra fuzzy.

3.5.3 Camada de Saída

A camada de saída do sistema de inferência fuzzy tem por finalidade a agregação das regras de inferência, bem como a defuzzificação do conjunto fuzzy gerado pela agregação das regras de inferência.

No projeto de sistemas de inferência fuzzy, a escolha tanto do método de agregação como do método de defuzzificação constitui em uma decisão importante. O método de agregação das regras de inferência fuzzy deve ser tal que, o conjunto fuzzy resultante da agregação seja capaz de inferir adequadamente o conhecimento explicitado pelo conjunto de regras fuzzy do mesmo. De forma análoga, o método escolhido para a defuzzificação deve ser capaz de expressar, em um valor não fuzzy, o conjunto fuzzy resultante da agregação fuzzy.

Além destes aspectos operacionais, os métodos de agregação e defuzzificação devem atender os requisitos de desempenho computacional, a fim de reduzir o esforço computacional necessário ao processamento do sistema fuzzy. Neste trabalho, utiliza-se como método de agregação o operador “máximo” e para a defuzzificação o método “centro de área” (Pedrycz & Gomide, 1998), o qual produzirá a única saída defuzzificada do sistema.

Neste trabalho, a camada de saída do sistema fuzzy também é ajustada, sendo a mesma representada por conjuntos fuzzy da camada de saída. O ajuste desta camada ocorre de forma semelhante ao da camada de entrada. A Figura 3.5 apresenta um diagrama esquemático do modelo fuzzy multicamadas para um sistema composto de duas entradas e três regras de inferência ativadas.

Figura 3.5 – Sistema fuzzy multicamada.

3.6 Ajuste Estrutural de Sistemas de Inferência Fuzzy

De uma forma genérica, em aplicações envolvendo identificação de sistemas e modelagem fuzzy, é conveniente empregar funções custo que expressem o desvio entre os resultados desejados e os resultados fornecidos pelo sistema fuzzy. Desta forma, esta função pode ser explicitada em termos do erro quadrático médio entre a saída do sistema fuzzy e os resultados desejados, os quais são fornecidos na forma de um conjunto de treinamento, semelhante às redes neurais artificiais com treinamento supervisionado. Além do erro quadrático médio, pode-se acrescentar à função custo alguns indicadores de regularização dos dados, auxiliando assim, na melhoria da resposta do sistema na presença de ruídos nos dados de treinamento.

Apesar de acrescentar uma nova tarefa no processo de criação de um sistema de inferência fuzzy, a definição da função custo associada ao sistema, em conjunto com as técnicas delineadas neste trabalho, vêm a poupar esforço do projetista nas etapas de sintonia das funções de pertinência e inclusive na criação das regras de inferência fuzzy.

O algoritmo de criação de base de regras empregado neste trabalho é baseado no algoritmo de otimização Hill Climbing (ROGER JANG et al, 1997). Assim, o procedimento desenvolvido tem o objetivo de realizar uma busca em um determinado espaço válido.

Formalmente, dado um espaço de busca S e um conjunto factível F , $F \subseteq S$, deve-se encontrar r^* tal que a expressão (3.14) seja verdadeira, ou seja:

$$\xi(r^*) \leq \xi(r) ; \quad \forall r \in F \quad (3.15)$$

onde $\xi(\cdot)$ representa a função custo associada ao sistema fuzzy, r é uma determinada base de regras pertencente ao conjunto de todas as bases de regras válidas e r^* configura a base de regras que fornece o menor valor para a função custo em relação à região factível F .

No entanto, a busca de uma base de regras que minimize a função custo ξ configura uma sistemática complexa visto que o universo F representando todas as bases de regras factíveis possui inúmeras possibilidades. Além disso, a superfície definida por ξ é composta de pontos de mínimos e de máximos, comprometendo assim a busca por uma solução que satisfaça a condição de mínimo global.

Desta forma, torna-se conveniente a adoção de estratégias de busca que operem localmente. Assim, a expressão (3.15) pode ser modificada conforme apresentado a seguir:

$$\xi(r^{(1)}) \leq \xi(r^{(2)}) ; \quad \forall r^{(2)} \in N(r^{(1)}) \quad (3.16)$$

onde:

$$N(r^{(1)}) = \{r^{(2)} \in F : dist(r^{(1)}, r^{(2)}) \leq \varepsilon\} \quad (3.17)$$

onde $dist(r^{(1)}, r^{(2)})$ é uma função que determina a distância entre $r^{(1)}$ e $r^{(2)}$, e ε é uma constante que define o raio da função vizinhança $N(\cdot)$.

Portanto, devido à complexidade do processo de busca de uma base de regras que satisfaça a condição (3.16), o algoritmo de otimização estrutural proposto neste trabalho opera em duas fases distintas. Na primeira fase são sorteadas diversas bases de regras. A base de regras que fornecer o menor custo é aceita. Desta maneira, o espaço de busca ficará restrito a uma determinada região definida pelo conjunto $N(r^{(1)})$, onde $r^{(1)}$ representa a base de regras sorteada que apresentou o menor custo frente às demais.

Tendo como ponto inicial a base de regras $r^{(1)}$ escolhida na primeira fase, tem-se na segunda fase a realização do ajuste local através da inserção de pequenas perturbações na base de regras original. Caso a perturbação inserida proporcione uma redução do custo, tal perturbação é aceita e o processo continua até que não se observe melhoria significativa no

sistema por um determinado número de iterações. O algoritmo de extração de regras baseado na abordagem descrita é apresentado na Figura 3.6.

```
Inicializar o sistema fuzzy
R1 ← Selecionar uma base de regras aleatória
Contador ← 0
REPITA
  R2 ← Selecionar uma base de regras aleatória
  SE custo(R2) < custo(R1)
  ENTÃO
    R1 ← R2
    Contador ← Contador + 1
  FIM SE
ATÉ Contador muito grande

Contador ← 0
REPITA
  R2 ← Inserir uma pequena perturbação em R1
  SE custo(R2) < custo(R1)
  ENTÃO
    R1 ← R2
    Contador ← Contador + 1
  FIM SE
ATÉ Contador muito grande
```

Figura 3.6 – Algoritmo de extração de regras fuzzy.

3.7 AJUSTE PARAMÉTRICO DE SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY

Nesta seção será apresentado um método de sintonia de sistemas de inferência fuzzy baseado em algoritmos de retropropagação de erro e técnicas de otimização. Este método tem por objetivo a minimização de uma função custo associada ao sistema de inferência fuzzy.

A formalização de um sistema de inferência fuzzy na forma de um sistema multicamadas, como apresentado na Seção 3.5, pode ser justificada não só pela divisão operacional distinta de cada uma destas camadas, mas também, pela presença em cada qual de parâmetros livres distintos. Como apresentado anteriormente, tem-se na camada de entrada os parâmetros das funções de pertinência dos conjuntos fuzzy do espaço de entrada do sistema,

na camada de inferência fuzzy se tem a ponderação das regras e na camada de saída os parâmetros das funções de pertinência dos conjuntos fuzzy do espaço de saída.

Considerando que o conjunto de ajuste $\{x, y\}$ é fixo durante todo o processo de ajuste, então a função custo responsável pela sintonia dos parâmetros livres do mapeamento fuzzy $g: x \rightarrow y$ pode ser escrita da seguinte forma:

$$\xi_g = \xi(\mathbf{h}^{(1)}, \mathbf{h}^{(2)}, \mathbf{h}^{(3)}) \quad (3.18)$$

onde $\mathbf{h}^{(1)}$, $\mathbf{h}^{(2)}$ e $\mathbf{h}^{(3)}$ representam respectivamente os vetores dos parâmetros das funções de pertinência de entrada, o vetor da ponderação das regras de inferência e o vetor dos parâmetros das funções de pertinência de saída.

Assim, após a minimização da função custo ξ_g , os diversos parâmetros livres incorporados nos vetores $\mathbf{h}^{(1)}$, $\mathbf{h}^{(2)}$ e $\mathbf{h}^{(3)}$ corresponderão aos valores que minimizam a respectiva função custo.

Logo, o problema de ajuste paramétrico de um sistema de inferência fuzzy pode ser interpretado como sendo um problema de otimização irrestrita, podendo este ser resolvido por qualquer método disponível para tal. Neste trabalho utilizou o método do gradiente descendente para a minimização da função custo e o cálculo do gradiente foi estimado através do emprego do método de equações às diferenças.

Para elucidar este processo de ajuste, considera-se um sistema fuzzy tendo na camada de entrada uma variável com duas funções de pertinência gaussiana, a camada de inferência composta de três regras e a camada de saída com uma variável composta por duas funções de pertinência gaussiana. Assim sendo, os vetores de parâmetros $\mathbf{h}^{(1)}$, $\mathbf{h}^{(2)}$ e $\mathbf{h}^{(3)}$ serão dados por:

$$\mathbf{h}^{(1)} = [\mu_1^e \quad \sigma_1^e \quad \vdots \quad \mu_2^e \quad \sigma_2^e]^T \quad (3.19)$$

$$\mathbf{h}^{(2)} = [w_1 \quad w_2 \quad w_3]^T \quad (3.20)$$

$$\mathbf{h}^{(3)} = [\mu_1^s \quad \sigma_1^s \quad \vdots \quad \mu_2^s \quad \sigma_2^s]^T \quad (3.21)$$

onde μ_i^e e σ_i^e são respectivamente a média e a variância da i -ésima função de pertinência de entrada; w_1 , w_2 e w_3 são os fatores de ponderação das regras fuzzy; μ_i^s e σ_i^s são respectivamente a média e a variância da i -ésima função de pertinência de saída.

Para o caso de ajuste camada a camada, basta aplicar então o método do gradiente descendente em cada uma delas. Para o caso da segunda camada, representando os fatores de ponderação das regras, tem-se a seguinte expressão:

$$\mathbf{h}^{(2)}(k) = \mathbf{h}^{(2)}(k-1) + \eta \cdot \nabla \xi(\mathbf{h}^{(2)}(k-1)) \quad (3.22)$$

sendo η a taxa de aprendizagem. Neste caso, o vetor gradiente $\nabla \xi(\mathbf{h}^{(2)})$ pode ser dado de forma genérica por:

$$\nabla \xi(\mathbf{h}^{(2)}) = \left[\frac{\partial \xi}{\partial h_1^{(2)}} \quad \frac{\partial \xi}{\partial h_2^{(2)}} \quad \dots \quad \frac{\partial \xi}{\partial h_n^{(2)}} \right]^T \quad (3.23)$$

onde $h_i^{(2)}$ representa o i -ésimo elemento do vetor de parâmetros $\mathbf{h}^{(2)}$ e n é o número de elementos deste vetor. Neste caso, como a expressão analítica do vetor gradiente é de difícil obtenção, utiliza-se a aproximação numérica do mesmo através do método de equações às diferenças, ou seja:

$$\frac{\partial \xi}{\partial h_i^{(2)}} \cong \frac{\xi(\mathbf{h}^{(2)} + \rho \cdot \mathbf{e}_i) - \xi(\mathbf{h}^{(2)})}{\rho} \quad (3.24)$$

onde ρ é um valor muito pequeno e $\mathbf{e}_i = [0 \ 0 \dots 1 \dots 0]^T$, sendo que o elemento igual a 1 ocupa a posição i .

A função custo ξ_g neste caso é a própria função erro quadrático médio em relação aos p padrões de sintonia, ou seja:

$$\xi_g = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \xi_{g(k)} \quad (3.25)$$

sendo que $\xi_{g(k)}$ é o erro quadrático em relação ao k -ésimo padrão de treinamento, ou seja:

$$\xi_{g(k)} = (d_k - y_k)^2 \quad (3.26)$$

onde d_k é o valor da saída desejada em relação ao k -ésimo padrão de treinamento e y_k é a saída fornecida pelo sistema fuzzy também em relação ao k -ésimo padrão de treinamento.

A Figura 3.7 ilustra o algoritmo de sintonia paramétrica proposto neste trabalho quando aplicado na otimização da camada $\mathbf{h}^{(2)}$.

```
Inicializar os parâmetros livres do sistema fuzzy multicamadas
Codificar os parâmetros em  $h^{(1)}$ ,  $h^{(2)}$  e  $h^{(3)}$ 
Deixar  $h^{(1)}$  e  $h^{(3)}$  fixos
Época  $\leftarrow 0$ 
REPITA
  PARA todos os padrões de sintonia FAÇA
    Propagar padrão camada a camada e obter saída  $y_k$ 
    Guardar o erro quadrático do respectivo padrão
    Calcular  $\nabla \xi(h^{(2)})$ 
    Atualizar  $h^{(2)}$ 
  FIM PARA
  Obter o erro quadrático médio  $\xi_g$ 
  Época  $\leftarrow$  Época + 1
ATÉ ( $\xi_g < \varepsilon$ ) OU (Contador muito grande)
```

Figura 3.7 – Algoritmo de sintonia paramétrica.

Os procedimentos para os ajustes das camadas $h^{(1)}$ e $h^{(3)}$ são similares a aqueles fornecidos na Figura 3.7.

3.8 Considerações Sobre o Sistema Fuzzy Multicamadas

A especificação do sistema fuzzy multicamadas proposto neste trabalho pode então ser realizada se definindo, além do número de entradas do mesmo, o número de funções de pertinência associadas à cada uma destas entradas e o número de funções de pertinência para a saída do mesmo.

Assim, como exemplo do sistema fuzzy multicamadas proposto, toma-se um sistema de duas entradas e para cada uma das entradas se tem três funções de pertinência gaussianas associadas. Supõe-se ainda que a variável de saída tem duas funções de pertinência gaussianas associadas e uma base de regras composta de cinco regras. Admitindo-se que a cada função gaussiana possui dois parâmetros livres de ajuste, a média e a variância, então a camada de entrada possuirá 12 parâmetros livres de ajuste, da mesma maneira que a camada de saída possuirá 4 parâmetros de ajuste. Como cada regra possui um fator de ponderação, a base de regras possuirá cinco parâmetros de ajuste. Desta forma, tem-se que o número total de parâmetros livres a serem ajustados será 21.

Valendo-se de uma nova abordagem do ponto de vista de definição, o sistema fuzzy passa a ser definido na forma de um modelo de três camadas. Cada uma destas camadas vem a representar as tarefas desempenhadas pelo sistema de inferência fuzzy, ou seja, as tarefas de fuzzificação, inferência das regras fuzzy e defuzzificação.

O ajuste do sistema de inferência fuzzy, proposto neste trabalho, é desempenhado através da adaptação dos parâmetros livres de cada uma destas camadas com o objetivo de minimizar a função custo definida inicialmente.

A princípio, o ajuste paramétrico pode ser efetuado camada a camada separadamente, não impedindo, no entanto, que este venha a ser realizado em todas as camadas a cada interação. A distinção operacional de cada camada, onde o ajuste dos parâmetros de uma camada pouco influi no desempenho das demais, permite o ajuste individual das camadas. Desta forma, a rotina de sintonia do sistema de inferência fuzzy adquire uma maior flexibilidade quando comparada ao processo de treinamento empregado em redes neurais artificiais.

Desta maneira, o algoritmo de ajuste proposto neste trabalho possui duas etapas distintas de operação. Na primeira etapa, a base de regras é gerada de forma a minimizar a função custo associada ao sistema. Na segunda etapa, a sintonia fina do sistema é realizada através da adequação dos parâmetros livres do sistema, ou seja, nesta etapa os parâmetros das funções de pertinência das entradas e das saídas, bem como a ponderação de cada regra é alterada de forma a otimizar o sistema fuzzy.

Capítulo 4. MAPEAMENTO NEBULOSO DOS GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO MINERAL ISOLANTE A PARTIR DE ENSAIOS FÍSICO- QUÍMICOS

4.1 ABORDAGEM FUZZY PARA ESTIMAÇÃO APRIMORADA DOS GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO MINERAL ISOLANTE

O foco desse trabalho é a estimação dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante a partir de resultados de ensaios físico-químicos. Desta maneira, a partir de valores obtidos em ensaios físico-químicos do óleo mineral isolante, tais como a rigidez dielétrica, o fator de potência, a tensão interfacial entre outros, o sistema desenvolvido será capaz de estimar os valores de gases presentes no óleo isolante. Assim, deseja-se estimar a concentração do hidrogênio (H_2), do oxigênio (O_2), do nitrogênio (N_2), do monóxido de carbono (CO), do dióxido de carbono (CO_2), do metano (CH_4), do etileno (C_2H_4), do etano (C_2H_6) e do acetileno (C_2H_2).

A estimação da concentração de cada um dos gases supracitados foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa, denominada “Sistemas fuzzy estimativa inicial”, 9 sistemas fuzzy, um para cada gás, foram desenvolvidos com a finalidade de, a partir dos resultados advindos dos ensaios físico-químicos, obtivessem a primeira estimativas das concentrações dos gases dissolvidos no óleo isolante de transformadores. Essa primeira estimativa é então empregada como dados de entrada para a segunda etapa. Na segunda etapa, denominada “Sistemas fuzzy estimativa refinada”, também composta por 9 sistemas de inferência fuzzy, as estimativas feitas na primeira etapa são relacionadas de forma a inferir concentrações para os gases dissolvidos com uma maior precisão.

A Figura 4.1 apresenta a arquitetura elaborada para a estimação dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante a partir de dados de ensaios físico-químicos.

Figura 4.1 – Arquitetura do sistema fuzzy para estimação dos gases

4.2 DADOS EMPREGADOS NO DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PROPOSTO

Abaixo tem-se a Tabela 4.1 com os dados utilizados no desenvolvimento do presente trabalho. Ao todo foram empregados 506 resultados de transformadores de potência distintos para os ensaios físico-químicos e cromatográficos para ajuste e validação do sistema fuzzy proposto.

Tabela 4.1 – Dados reais utilizados para validação do sistema fuzzy proposto.

Cor	Densidade	Tensão Interfacial	Teor de Água	Índice de Neutralização	Rigidez Dielétrica	Fator de Potência	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
1.5	0.868	23	37	0.1	28	2.7	31	12000	56000	220	21	2800	13	27	0
1	0.85	30	18	0.042	52	1.2	21	12000	51000	230	12	2700	2	13	0
1	0.868	30	23	0.033	49	1.1	7	17000	58000	370	17	3700	12	27	0
1	0.865	30.5	22	0.053	49	1	17	18000	68000	210	3	2800	12	17	0
1.5	0.868	26	24	0.019	46	2.1	7	12000	61000	310	27	3100	2	41	0
1	0.868	31	22	0.042	45.5	3.1	0	17000	67000	110	3	2700	0	13	126
4.5	0.88	17	61	0.29	7	5.1	37	13000	56000	180	340	3100	520	280	0
2.5	0.881	29	23	0.072	45	2.8	12	13000	46000	71	25	1300	2	71	0
2.5	0.877	25	22	0.098	45	3.1	0	13000	39000	120	16	1800	2	21	0
1.5	0.877	33	22	0.042	45	2.2	11	13000	46000	82	7	1200	2	21	0

Cor	Densidade	Tensão Interfacial	Teor de Água	Índice de Neutralização	Rigidez Dielétrica	Fator de Potência	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
3	0.875	20	29	0.23	32	7.1	41	18000	54000	290	27	4900	21	51	0
2	0.848	23	18	0.21	41	5.1	37	14000	52000	210	21	2100	12	28	0
2	0.878	26	31	0.098	37	4.1	31	12000	51000	310	17	3100	2	42	0
2	0.877	22	24	0.14	46	4.2	37	17000	57000	410	42	4900	12	110	0
1	0.868	25	23	0.061	47	2.3	37	11000	51000	280	27	3800	2	12	0
0.5	0.868	28	24	0.019	45	2.2	27	18000	54000	180	18	280	15	45	0
1	0.868	30	18	0.016	38	1.8	8	12000	62000	210	2	2100	2	12	0
1.5	0.865	22	24	0.12	41	3.3	17	17000	61000	320	21	3200	12	17	0
1.5	0.885	30	21	0.021	51	2.1	27	17000	53000	210	12	3100	12	27	0
3	0.882	20	24	0.19	39	3.6	0	12000	48000	340	17	4400	2	62	0
2.5	0.885	18	49	0.22	18	7.1	370	8900	53000	290	84	6900	32	2	0
1	0.862	35	41	0.028	22	0.09	0	17000	45000	120	2	1200	0	7	0
1	0.849	32	17	0.028	56	1.2	2	11000	51000	110	2	970	1	3	0
1.5	0.852	24	26	0.072	44	3.3	0	12000	61000	190	93	2100	11	163	0
1	0.866	32	23	0.028	46	1.1	0	7100	51000	130	2	1300	2	12	0
1	0.862	35	24	0.028	46	1.1	0	9100	61000	180	18	1800	2	5	0
1	0.845	30	18	0.033	52	1.2	0	7100	17000	130	2	1100	2	2	0
2	0.877	25	24	0.072	48	2.9	0	17000	41000	84	21	580	12	44	0
0.5	0.848	42	24	0.01	47	0.6	17	8300	62000	280	17	3900	4	18	0
1	0.85	34	25	0.013	41	1.1	17	8200	92000	310	21	3800	2	13	0
1	0.848	34	16	0.012	55	0.9	27	18000	68000	210	2	2700	2	12	0
1	0.848	30	21	0.012	52	1.3	27	18000	57000	130	27	4900	3	15	0
1	0.868	25	23	0.061	47	2.3	17	6100	61000	260	27	4800	2	12	0
0.5	0.852	35	17	0.01	51	0.6	0	12000	52000	210	0	2100	0	0	0
1.5	0.875	26	26	0.046	39	2.6	0	17000	56000	96	4	1800	0	0	0
0.5	0.852	33	28	0.027	35	1.4	0	19000	54000	98	0	2500	3	0	0
0.5	0.85	32.5	16	0.052	54	1.7	0	18000	49000	83	0	2300	0	0	0
1.5	0.877	24	16	0.061	58	2.2	0	18000	31000	140	0	650	0	0	0
1	0.848	32	18	0.023	51	1.8	0	17000	52000	120	2	1200	0	0	0
1	0.852	28	25	0.025	45	1.2	0	16000	41000	160	3	1300	0	0	0
1	0.875	35	26	0.019	45	2.1	0	8600	38000	210	15	2500	5	15	0
1	0.875	35	28	0.021	40	1.2	37	8200	63000	210	17	2100	0	0	0
0.5	0.849	37	24	0.01	41	0.6	0	16100	62000	230	0	740	0	0	0
1.5	0.855	25	28	0.068	38	3.2	0	12000	51000	250	13	710	0	0	0
1.5	0.848	32	26	0.042	45	2.1	0	12000	62000	370	2	1500	0	0	0
2	0.882	23	37	0.098	27	3.2	0	12000	62000	210	0	2200	11	46	0
1	0.847	32	25	0.033	44	1	0	7100	43000	67	0	380	0	0	0
1.5	0.863	27	28	0.068	37	2.7	0	11000	39000	85	0	870	0	0	0
2	0.874	30	25	0.5	48	2.8	21	13000	53000	280	0	4800	2	15	0
1	0.847	27	18	0.042	52	3.2	25	13000	34000	190	0	1900	0	0	0
1	0.868	36	24	0.014	46	2.2	0	13000	43000	110	0	2100	0	0	0
0.5	0.848	36	21	0.012	49	1.1	0	11000	51000	230	0	2300	0	0	0
0.5	0.85	40	18	0.01	51	0.7	0	13000	53000	120	0	1400	0	0	0
0.5	0.85	40	28	0.011	33	0.9	0	12000	52000	170	0	2200	0	0	0
1	0.868	33	25	0.019	45	1.2	0	17000	51000	410	3	4200	12	31	0
0.5	0.88	24	32	0.047	32	1.7	17	17000	42000	210	3	2100	2	12	0
1	0.852	20	25	0.075	45	2.4	37	12000	52000	310	2	4100	2	51	0
1	0.868	33	19.5	0.028	41	2	0	5300	58000	180	0	2100	0	0	0
1	0.866	34	23	0.014	45	1.1	18	18000	56000	280	21	3100	2	81	0

Cor	Densidade	Tensão Interfacial	Teor de Água	Índice de Neutralização	Rigidez Dielétrica	Fator de Potência	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
1.5	0.862	30	22	0.028	48	3.1	17	17000	57000	310	12	4900	12	27	0
1	0.85	29	22	0.021	48	1.1	17	8900	57000	290	120	7800	18	160	0
1.5	0.87	26	48	0.023	18	2.2	27	7200	62000	220	22	2800	17	27	0
1	0.848	28	25	0.025	42	1.1	23	18000	56000	130	21	4600	2	13	0
1.5	0.88	31	22	0.024	41	2.2	31	12000	52000	280	31	4900	27	47	0
1.5	0.875	31	21	0.018	44	2.6	27	9100	62000	240	92	5200	21	97	0
1.5	0.87	26	18	0.036	56	2.2	17	17000	51000	210	17	3700	12	46	0
2	0.872	26	18	0.072	56	2.8	37	18000	78000	310	27	4100	12	36	0
1.5	0.87	25	26	0.06	45	3.3	31	12000	57000	220	12	2900	3	15	0
1.5	0.85	24	24	0.056	47	3.4	0	12000	68000	210	3	2800	2	12	0
1.5	0.878	35	25	0.015	46	3.3	31	8900	39000	410	28	4900	23	12	0
1.5	0.87	23	18	0.02	51	3.2	27	8600	38000	350	79	5500	25	15	0
1.5	0.885	28	24	0.047	44	2.2	0	13000	46000	260	95	5400	12	71	0
1	0.85	29	22	0.026	49	1.2	13	14000	51000	270	77	4400	13	29	0
2.5	0.848	16	25	0.29	45	6.2	77	15000	52000	280	81	5900	21	78	0
1	0.855	28	18	0.014	53	1.7	23	11000	55000	140	29	2500	17	61	0
1	0.848	19	25	0.07	43	2.2	18	12000	56000	210	31	2800	17	53	0
1	0.85	27	25	0.022	45	1.3	12	12000	58000	110	21	1200	7	17	0
1	0.848	30	26	0.028	45	1.3	21	13000	53000	210	2	1800	2	12	0
2.5	0.875	23	29	0.095	38	3.7	17	17000	58000	310	21	3100	12	71	0
0.5	0.85	38	16	0.01	54	1.1	17	17000	56000	170	2	1100	2	12	0
1.5	0.878	20	34	0.16	31	3.1	21	12000	52000	230	21	2700	2	12	0
2	0.868	24	34	0.078	35	3.1	0	7100	51000	170	180	2800	47	550	0
1	0.868	26	45	0.056	15	2.1	12	18000	32000	110	2	3100	3	4	0
1.5	0.868	26	32	0.056	34	2.7	15	16000	35000	120	3	3400	4	4	0
1.5	0.852	26	17	0.042	51	2.8	0	10000	55000	150	70	1600	4	190	0
2	0.868	27	24	0.084	43	2.1	0	15000	51000	100	4	560	0	0	0
1.5	0.864	20	38	0.16	22	3.7	180	5800	47000	350	480	9000	1800	370	13
1	0.848	28.5	25	0.04	40.5	1.4	0	14000	46000	180	12	1100	4	15	0
0.5	0.848	32	24	0.021	45.1	1.1	0	11000	45000	700	1	210	0	0	0
1.5	0.865	30	15	0.056	53	1.7	14	5100	47000	160	4	2100	8	4	0
0.5	0.847	37	18	0.015	51	0.5	0	7700	47000	110	2	540	0	0	0
0.5	0.847	37	18	0.015	50	0.7	0	11000	47000	110	1	530	0	0	0
1.5	0.865	28	23	0.056	45	2.8	130	10000	36000	180	4	3100	8	4	0
2	0.865	26	22	0.056	45	2.7	110	14000	51000	170	3	3100	7	7	0
1.5	0.8719	27	6	0.04	58.5	2.1	0	7500	19000	6	0	55	0	0	0
1.5	0.848	20.5	26	0.119	43.7	3.1	0	15000	51000	110	0	1400	0	0	0
1.5	0.868	22.5	25	0.117	48.8	3.2	74	6400	44000	190	260	4100	5	290	0
1.5	0.858	23.5	26	0.085	43.8	2.4	14	16000	48000	110	4	2800	6	4	0
1	0.858	29	20	0.033	43	0.8	0	11000	45000	57	2	530	0	1	0
1	0.864	28	26	0.046	44.8	1.7	0	17000	51000	110	2	2300	5	3	0
1	0.845	20	25	0.118	46.1	2.3	0	8300	15000	110	48	4100	550	540	0
1.5	0.854	25.5	25	0.075	48.3	3.1	13	4500	51000	540	14	7200	6	3	0
3.5	0.879	18.5	24	0.562	45.4	4.2	47	9700	49000	370	5	6300	8	9	0
2.5	0.898	15.5	39	0.999	28.8	4.7	260	4200	51000	350	23	6700	9	120	0
1	0.851	30	25	0.037	47.6	1.1	71	5200	48000	480	39	7800	3	17	0
1	0.851	28.5	30	0.046	39	1.2	77	5100	47000	470	37	7800	3	15	0
1.5	0.867	28.5	51	0.04	37.3	2.7	17	16000	37000	120	3	3800	3	1	0
1.5	0.867	27	87	0.066	22.2	2.7	18	17000	38000	110	2	3700	3	1	0

Cor	Densidade	Tensão Interfacial	Teor de Água	Índice de Neutralização	Rigidez Dielétrica	Fator de Potência	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
1	0.871	19	26	0.147	44.6	4.1	71	12000	37000	430	47	7400	38	31	0
1	0.845	20	33	0.119	39.9	3.7	67	11000	38000	440	45	7700	37	33	0
1	0.877	25.5	23	0.104	48.2	1.3	0	16000	51000	120	13	3100	13	24	0
1	0.856	21.5	26	0.125	47.5	1.7	0	17000	41000	110	11	3100	12	21	0
1	0.857	24	16	0.052	61	1.2	0	16000	41000	180	4	2100	1	0	0
1	0.855	20	62	0.181	19.9	1.7	0	14000	52000	82	2	1600	3	7	0
1.5	0.876	27	24	0.06	48.1	1.1	0	17000	57000	70	1	1410	2	1	0
1	0.876	27.5	18	0.063	50	1.2	12	11000	68000	340	290	5300	0	45	0
3	0.854	20	69	0.539	47.6	4.1	0	15000	41000	170	7	2300	3	0	0
1.5	0.873	18.5	34	0.3	31.7	2.1	0	16000	53000	67	1	610	2	0	0
1	0.866	30.5	23	0.049	56.2	1.1	81	11000	39000	190	36	3500	61	5	73
0.5	0.85	28	19	0.036	48.6	0.2	0	17000	47000	120	2	3100	0	0	0
2.5	0.891	14.5	24	2.73	47.5	5.2	25	12000	52000	140	17	1500	3	1	0
1.5	0.884	15	39	0.628	32.4	4.7	21	17000	46000	120	15	2300	3	1	0
1	0.884	24.5	18	0.067	55.1	2.1	0	18000	52000	180	15	2500	35	17	0
1	0.855	22	16	0.124	57.4	2.3	0	16000	51000	170	12	2400	33	15	0
1.5	0.887	20	19	0.131	52.7	4.1	120	11000	55000	250	280	7100	470	230	0
2	0.854	15	19	0.377	51.1	3.7	110	9500	54000	230	270	7400	580	210	0
1	0.883	24.5	32	0.092	14.6	1.7	0	16000	38000	230	7	3300	7	3	0
1.5	0.884	26	20	0.071	51	1.7	0	15000	37000	220	4	3300	6	2	0
2	0.878	15.5	48	0.965	20.9	7.1	37	12000	52000	170	46	4600	13	240	0
1.5	0.853	20	25	0.143	46.6	2.8	27	11000	51000	180	45	4500	8	230	0
1	0.879	23.5	25	0.025	44.2	1.7	0	14000	38000	130	52	4700	17	210	0
1	0.893	23	24	0.07	41	2.1	0	11000	37000	110	53	4500	18	210	0
1	0.852	28	23	0.056	42.7	1.8	0	6700	42000	370	21	4700	2	37	0
1	0.853	27	27	0.06	48.7	1.7	0	7400	41000	360	22	4900	3	35	0
2	0.881	14.5	56	1.11	27.7	6.3	17	17000	43000	120	4	4600	4	12	0
1.5	0.874	20	53	0.268	28.7	3.7	17	5500	55000	250	71	7200	21	97	0
3	0.87	24	30	0.111	39.9	4.3	0	12000	56000	110	11	950	3	26	0
1.5	0.88	28	17	0.103	54.9	3.1	0	12000	54000	210	17	4100	23	2	0
1.5	0.85	30.5	16	0.048	54.2	2.1	0	13000	47000	340	15	6300	21	8	0
1	0.857	24	16	0.068	51.5	3.1	0	14000	43000	160	45	3100	27	91	0
1	0.854	22	21	0.077	46.1	2.6	0	11000	61000	240	21	1700	2	45	0
1	0.854	21	19	0.058	54.4	3.1	0	11000	67000	180	7	1500	1	26	0
1.5	0.854	22.5	25	0.107	44.2	2.7	0	11000	37000	270	27	1900	3	45	0
2	0.852	19	21	0.241	42.8	3.7	0	15000	52000	170	4	2100	2	5	0
2	0.872	27	20	0.105	58.3	1.6	0	11000	33000	310	97	3100	23	120	0
1.5	0.883	22.5	23	0.101	58.7	1.7	0	14000	35000	130	6	1900	2	23	0
1.5	0.868	22	32	0.19	34.6	2.7	0	7300	41600	133	9	2883	10	17	0
1	0.866	36.1	41	0.035	23.3	0.7	0	15100	39800	60	7	589	4	0	0
1.5	0.883	26	16	0.097	62.2	1.3	0	9300	37000	54	3	712	1	7	0
1	0.868	28	24	0.065	52.6	1.2	0	12500	32600	60	1	1297	1	0	0
1	0.871	30.5	36	0.079	21.5	1.1	0	12000	33400	101	4	3369	32	5	52
1	0.867	28	20	0.058	48.1	1.2	0	7600	37200	41	6	609	1	10	0
1.5	0.869	29.5	18	0.06	51.1	1.2	0	13200	33900	73	1	813	28	0	0
1	0.869	24	19	0.078	51.7	1.4	0	12000	51000	120	3	2100	21	110	0
1	0.869	25.5	20	0.074	43.8	2.4	0	10500	47500	188	3	3816	3	4	0
1	0.867	29	38	0.042	25.5	2.2	0	7200	41900	434	7	7393	9	3	0
0.5	0.851	25.5	39	0.039	27.8	1.2	0	4700	48900	114	26	2195	4	65	0

Cor	Densidade	Tensão Interfacial	Teor de Água	Índice de Neutralização	Rigidez Dielétrica	Fator de Potência	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
1.5	0.865	22.5	42	0.149	24.3	2.8	0	2200	43900	203	24	3174	7	75	0
2	0.855	19	23	0.341	50.3	3.7	170	12000	52000	210	2	3200	370	120	0
1.5	0.871	24.5	35	0.114	29.2	2.7	0	6300	50800	154	27	6285	7	9	0
1.5	0.867	22.5	29	0.096	50.6	3.1	0	14000	49600	144	10	2859	16	14	0
1.5	0.852	18.5	49	0.228	22.1	3.7	143	4700	48100	535	91	14286	10	44	0
1	0.851	24	24	0.096	38.1	2.2	0	11000	73100	55	2	1370	0	0	0
2	0.872	20	49	0.157	25.9	2.3	170	10700	60800	46	37	3299	5	52	0
1.5	0.871	15	24	0.768	39.5	2.8	34	18100	51800	42	2	4134	3	5	0
1.5	0.877	19.5	57	0.793	11.4	2.4	0	15200	48400	28	2	2933	4	2	0
1	0.852	32.5	34	0.07	32.3	1.1	11	18700	51600	80	8	4826	2	4	0
1.5	0.874	31.5	49	0.038	9.9	1.7	0	12900	51600	111	7	5872	5	4	0
1	0.87	33	24	0.044	46.3	1.2	15	12900	46800	38	8	2698	2	18	0
3	0.856	18	74	1.11	30.3	6.1	0	17200	79500	205	5	2848	19	11	0
2	0.875	24.5	34	0.184	38.9	2.7	0	23900	76100	94	40	1054	6	195	0
2.5	0.872	19.5	60	0.584	17	4.2	0	21700	69500	131	3	3600	5	3	0
1.5	0.874	20	42	0.268	31	4.1	42	20900	56500	51	1	480	0	0	0
1.5	0.86	23	24	0.121	49.1	3.2	0	14800	85500	199	29	1453	4	54	0
1.5	0.875	28	31	0.087	36.9	2.2	0	24300	74700	124	2	2866	22	0	0
1.5	0.86	22	34	0.213	43	3.1	23	13400	83700	253	81	2774	8	145	0
1.5	0.877	25.5	56	0.147	25.5	2.2	34	21300	74200	174	11	7051	79	6	347
1.5	0.852	23	34	0.052	35.8	2.7	15	7400	75500	179	20	1686	3	48	0
0.5	0.853	37	28	0.02	37.8	1.1	0	24200	62600	72	2	973	12	1	0
2.5	0.883	17.5	35	0.665	52.4	4.2	188	12400	78900	372	17	4983	22	15	17
1	0.845	20	25	0.118	46.1	2.3	0	8300	15000	110	48	4100	550	540	0
1.5	0.854	25.5	25	0.075	48.3	3.1	13	4500	51000	540	14	7200	6	3	0
3.5	0.879	18.5	24	0.562	45.4	4.2	47	9700	49000	370	5	6300	8	9	0
2.5	0.898	15.5	39	0.999	28.8	4.7	260	4200	51000	350	23	6700	9	120	0
1	0.851	30	25	0.037	47.6	1.1	71	5200	48000	480	39	7800	3	17	0
1	0.851	28.5	30	0.046	39	1.2	77	5100	47000	470	37	7800	3	15	0
1.5	0.867	28.5	51	0.04	37.3	2.7	17	16000	37000	120	3	3800	3	1	0
1.5	0.867	27	87	0.066	22.2	2.7	18	17000	38000	110	2	3700	3	1	0
1	0.871	19	26	0.147	44.6	4.1	71	12000	37000	430	47	7400	38	31	0
1	0.845	20	33	0.119	39.9	3.7	67	11000	38000	440	45	7700	37	33	0
1.5	0.873	18.5	34	0.3	31.7	2.1	0	16000	53000	67	1	610	2	0	0
1	0.866	30.5	23	0.049	56.2	1.1	81	11000	39000	190	36	3500	61	5	73
0.5	0.85	28	19	0.036	48.6	0.2	0	17000	47000	120	2	3100	0	0	0
1	0.872	28	23	0.047	43	2.6	130	12000	58000	260	46	3900	5	92	0
1	0.852	31	28	0.028	35	2.5	17	18000	68000	89	2	2300	7	3	0
1	0.852	31	16	0.036	50	2.5	37	13000	75000	180	15	4900	13	15	0
2	0.885	19	19	0.18	51	4.8	0	18000	53000	73	7	840	17	3	0
1	0.865	28	29	0.081	36	4.2	26	6100	64000	180	81	3900	8	210	0
2	0.858	27	21	0.058	49	3.8	37	14000	52000	210	43	2200	17	77	3
1	0.865	31	24	0.028	43.5	2.1	16	7100	43000	270	21	2800	2	4	0
1	0.865	26.5	17.5	0.07	53	3.2	13	6100	41000	290	71	3100	11	130	0
1	0.85	30	18	0.028	51.5	2.5	17	13000	47000	82	27	1800	8	69	0
2.5	0.875	28	37	0.062	31.4	1.7	0	11000	49000	250	18	6100	17	14	0
1.5	0.815	22.5	36	0.09	32.5	3.1	0	7700	61000	340	65	8800	10	170	0
2	0.874	17.5	40	0.28	30.1	3.4	0	17000	56000	110	3	2800	4	4	0
2	0.872	18.5	41	0.163	25.2	3.4	0	13000	37000	170	4	1800	6	8	0

Cor	Densidade	Tensão Interfacial	Teor de Água	Índice de Neutralização	Rigidez Dielétrica	Fator de Potência	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
0.5	0.866	35	20	0.01	47.3	0.3	0	7000	26000	15	0	57	0	0	0
1	0.863	28	34	0.031	38.8	1.8	430	7700	27000	61	77	360	141	14	104
0.5	0.865	35	71	0.01	20.5	1.7	6500	11000	39000	260	270	470	340	34	2200
1	0.871	22	30	0.05	33.9	3.4	47	9500	47000	330	150	8300	3	30	0
1	0.848	26	25	0.03	46.8	3.1	64	8200	47000	190	170	2700	6	30	0
1	0.862	28.5	20	0.033	52.7	0.8	13	5200	51000	130	47	4700	18	150	0
0.5	0.861	30	19	0.011	55	0.5	0	17000	37000	140	3	1100	1	3	0
0.5	0.857	30.5	18	0.01	56.5	0.7	0	18000	37000	130	3	1100	1	1	0
0.5	0.863	35	24	0.01	49.4	0.7	0	11000	49000	310	3	2600	0	0	0
1	0.85	21.5	20	0.073	56.6	2.7	11	9100	65000	180	4	1800	1	2	0
1.5	0.873	26	35	0.03	30.4	2.1	0	8400	58000	130	31	1800	3	63	0
2.5	0.879	24	24	0.05	49.1	0.58	37	3500	55000	370	41	5100	28	130	0
1	0.8695	40	15.8	0.012	64.7	0.26	0	11000	18200	50	0	320	0	0	0
1	0.8743	39.5	17.4	0.014	58.9	0.26	0	12900	21000	46	0	393	0	0	0
1	0.8735	41	13.6	0.01	61.4	0.2	0	18000	19000	67	0	660	0	0	0
1	0.875	40.5	16.8	0.011	61.4	0.23	0	15000	17200	52	0	563	0	0	0
1.5	0.85	21	26	0.053	41.5	2.1	32	8400	61000	170	17	3600	8	18	0
1	0.849	22	25	0.045	48.8	2.7	13	7100	51000	150	3	2800	7	37	0
1	0.849	21	26	0.042	45.5	2.1	31	6200	58000	210	15	3500	15	51	0
1	0.849	21.5	24	0.042	47.8	2.1	11	6300	57000	140	5	2700	4	37	0
1	0.852	21.5	27	0.049	39.7	2.3	27	6100	63000	180	10	3300	7	61	0
1.5	0.882	21	24	0.078	49.6	3.1	79	10000	50000	150	7	4700	7	13	0
0.5	0.859	34	25	0.01	48.1	1.1	15	15000	55000	75	3	1100	4	0	0
2.5	0.887	16.5	43	0.355	25.5	4.8	170	5300	38000	410	51	4900	37	57	0
1	0.848	24	18	0.07	54.6	2.7	21	6400	45000	140	7	1600	0	17	0
1	0.848	22	20	0.047	54.2	3.1	17	6100	43000	140	5	1500	0	15	0
1	0.848	23.5	19	0.033	53.4	2.1	17	11000	41000	77	2	1100	3	7	0
1	0.863	27.5	30	0.031	34.7	2.7	21	11000	48000	89	1	1100	4	10	0
1	0.861	30	18	0.013	53.3	1.12	21	12000	48000	220	5	3100	1	7	0
0.5	0.861	32	17	0.011	47.7	1.1	21	15000	51000	180	1	2400	3	2	0
0.5	0.865	32.5	18	0.01	53.4	1.3	17	15000	56000	170	2	2600	3	1	0
1.5	0.872	23.5	24	0.101	46.9	1.3	77	10000	40000	130	3	4900	6	4	0
0.5	0.879	37.5	23	0.01	45	0.7	17	16000	51000	79	2	1100	2	0	0
1	0.88	29	8	0.035	63	0.66	0	4300	25000	18	0	26	0	0	0
1	0.88	35	11	0.023	61	0.48	0	4100	22000	11	0	21	0	0	0
2	0.854	25.5	29	0.018	39.4	2.1	0	15000	41000	37	1	850	0	0	0
2	0.855	27	62	0.011	19	1.8	0	17000	41000	36	2	870	0	0	0
1.5	0.877	26	23	0.026	47.7	2.8	57	5800	61000	120	45	2700	8	140	0
1	0.851	32	22	0.01	47.5	1.1	15	4700	61000	150	7	3500	7	51	0
1	0.851	29.5	18	0.015	51.2	2.1	13	4600	52000	150	4	3500	26	100	0
1.5	0.854	25.5	19	0.037	51.1	1.7	13	17000	58000	420	55	6100	31	83	0
1.5	0.851	21	24	0.061	46	2.8	21	9700	37000	170	2	1700	1	8	0
1.5	0.851	23	26	0.039	44.1	1.7	200	3100	57000	310	110	3800	38	630	0
1	0.849	30	24	0.01	48	0.8	81	7000	57000	270	21	4900	5	22	0
1.5	0.87	24	33	0.054	31.7	2.7	270	5600	67000	210	28	3400	8	37	0
1	0.863	31	21	0.01	47.2	1.1	13	15000	48000	79	2	1600	1	3	0
1	0.858	28	27	0.029	43.5	1.7	0	16000	45000	110	1	1700	2	17	0
1.5	0.851	19	26	0.11	42.1	3.7	31	11000	57000	240	3	3400	4	8	0
1.5	0.851	21	24	0.097	44.6	2.8	16	11000	48000	170	2	1800	2	4	0

Cor	Densidade	Tensão Interfacial	Teor de Água	Índice de Neutralização	Rigidez Dielétrica	Fator de Potência	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
1.5	0.872	22.5	67	0.105	20.2	1.7	17	14000	54000	110	17	4100	87	25	0
1.5	0.864	20	59	0.131	21.7	3.1	15	13000	39000	140	5	3400	240	52	0
1	0.865	25.5	54	0.056	25.1	2.1	43	7600	52000	450	11	7100	4	5	0
0.5	0.866	35	17	0.01	49.6	0.7	0	17000	47000	120	3	1300	1	4	0
2	0.871	21	28	0.212	32.6	3.7	31	18000	51000	110	2	2700	1	1	0
1.5	0.85	19.5	15	0.067	50.5	3.1	38	5500	47000	210	11	4000	3	52	0
0.5	0.85	26	21	0.022	43.2	1.1	140	14000	47000	430	18	4700	7	7	0
1	0.852	23	16	0.038	53.6	2.1	0	18000	55000	130	3	2250	10	1	0
1	0.863	34	28	0.01	40	1.1	0	14000	50000	110	7	4300	47	37	0
2	0.881	21	16	0.085	50.5	2.7	58	8700	57000	250	3	1500	4	5	0
2.5	0.882	21	17	0.054	54.2	3.1	41	10000	47000	170	3	1100	3	2	0
2	0.87	22	17	0.082	53	2.7	23	13000	37000	140	1	1200	3	2	0
1.5	0.874	25.5	26	0.041	40.6	1.3	0	8700	42000	140	3	1800	2	0	0
1	0.864	16	25	0.123	46.3	3.1	77	16000	37000	170	3	4700	13	12	0
1	0.864	29.5	17	0.01	53.8	1.1	17	16000	37000	170	3	4700	7	3	0
1	0.849	25.5	18	0.04	51.1	1.7	12	4800	58000	150	51	2500	4	270	0
2	0.895	15	26	0.466	40	2.8	770	5100	55000	370	17	4700	3	35	0
1.5	0.865	31	23	0.01	48.6	1.3	0	11000	33000	130	1	1300	2	0	0
0.5	0.865	32.5	20	0.01	49.9	0.7	0	17000	50000	130	0	970	0	0	0
2	0.878	24	38	0.084	28	3.2	0	13000	41000	120	13	1700	0	0	0
3	0.854	17	19	0.21	50.6	4.1	21	13000	37000	170	4	3100	2	3	0
1.5	0.873	25	51	0.089	25.8	3.7	21	12000	48000	130	7	2700	5	3	0
1.5	0.873	26.5	30	0.07	47.6	3.7	0	11000	42000	77	3	2100	0	0	0
0.5	0.867	40	43	0.01	19.3	0.2	0	7100	27000	21	0	170	0	0	0
1.5	0.875	28	28	0.023	43.5	1.7	0	3700	35000	77	7	1100	3	11	0
1.5	0.893	24.5	27	0.022	41.2	2.8	11	5100	33000	84	44	1500	5	210	0
1	0.865	24.5	24	0.075	46.6	1.4	210	9500	55000	130	13	1800	3	17	0
1	0.873	30	27	0.011	42.9	1.1	210	9600	58000	120	7	1300	2	15	0
1	0.867	28.5	29	0.024	41.5	1.4	0	12000	38000	78	3	1300	0	0	0
1.5	0.863	24	26	0.105	45.4	1.4	0	17000	37000	77	1	1400	0	0	0
1	0.868	27	25	0.05	44.1	1.4	0	17000	37000	77	0	890	0	0	0
1.5	0.88	29	30	0.089	38.2	1.7	0	17000	34000	77	0	880	0	0	0
1	0.88	28.5	19	0.038	50.6	0.7	0	16000	52000	110	2	1300	1	0	0
1	0.881	30.5	39	0.042	30.3	1.1	0	17000	55000	71	1	1300	1	0	0
1	0.855	26	26	0.028	45.5	1.7	28	16000	37000	110	3	3800	3	3	0
1.5	0.871	29	31	0.037	34.6	0.4	77	13000	51000	210	17	4500	13	18	0
1	0.864	29	26	0.026	43.8	0.3	71	12000	41000	180	17	4400	12	17	0
1	0.879	29	20	0.022	50.1	0.4	41	12000	37000	180	13	2700	3	0	0
1.5	0.871	36	27	0.035	40.6	0.4	42	13000	35000	170	11	2800	2	0	0
1	0.871	32	63	0.02	18.2	0.3	27	15000	34000	82	2	3100	1	1	0
1	0.873	31	26	0.032	42.9	0.3	150	13000	37000	270	7	4700	5	0	0
1	0.871	37.5	99	0.014	16.1	0.4	170	12000	37000	120	3	4700	3	0	0
1.5	0.866	25	29	0.09	40	0.8	0	15000	36000	100	16	2700	31	3	0
1.5	0.866	30	26	0.042	36	2.2	0	12000	35000	130	5	1500	2	4	0
1.5	0.87	25.5	30	0.07	34.8	0.7	0	16000	37000	110	17	2800	41	4	0
1.5	0.866	27.5	20	0.046	52.2	0.6	0	16000	57000	88	3	1500	7	0	0
1.5	0.868	29	28	0.05	44.3	0.7	0	18000	55000	77	1	1300	3	0	0
1	0.867	26	27	0.062	43.7	1.3	17	12000	46000	84	7	880	3	31	0
1	0.847	24.5	20	0.036	52.4	1.1	18	11000	45000	83	8	890	2	35	0

Cor	Densidade	Tensão Interfacial	Teor de Água	Índice de Neutralização	Rigidez Dielétrica	Fator de Potência	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
1	0.879	26.5	29	0.035	41.4	1.3	0	8100	62000	120	3	1300	3	0	0
1	0.878	32	30	0.032	46	1.1	0	17000	44000	110	1	1400	2	0	0
1	0.862	25.5	30	0.038	40.1	1.3	0	14000	54000	120	8	1700	4	0	0
1	0.866	24	43	0.082	28	2.3	0	17000	53000	130	7	1800	5	0	0
1	0.847	22	24	0.036	42.9	1.7	0	7700	38000	77	1	1200	0	7	0
0.5	0.847	37.5	19	0.015	52.8	0.7	0	13000	32000	27	0	180	0	0	0
1.5	0.881	18.5	57	0.205	25.2	4.1	17	14000	34000	130	2	1300	0	0	0
1.5	0.881	19	23	0.119	47.4	3.1	0	12000	45000	130	0	1300	0	0	0
1.5	0.85	21	18	0.048	54.7	1.1	0	11000	38000	140	0	1400	0	0	0
1	0.863	26	20	0.043	46.2	1.7	0	13000	37000	110	0	770	7	0	0
1.5	0.867	22	19	0.06	54.7	2.1	0	11000	34000	120	0	780	0	0	0
1.5	0.867	22	27	0.053	41.9	2.7	0	8700	45000	110	0	1100	0	0	0
1.5	0.885	23	24	0.061	46	4.2	0	18000	61000	250	0	1250	0	0	0
3.5	0.883	19	24	0.211	47.3	5.7	0	6000	37000	120	3	1200	1	0	0
3	0.885	20	22	0.23	46	4.1	0	9100	42000	110	3	1040	1	0	0
1	0.873	26.5	21	0.016	45.2	1.1	0	8300	37000	130	0	1800	1	0	0
1	0.874	29.5	25	0.017	41.9	0.4	0	8700	38000	130	0	1700	3	0	0
1	0.872	27	22	0.01	47.7	0.7	0	7100	31000	110	0	790	0	0	0
1	0.85	23.5	17	0.02	47.9	0.7	0	13000	41000	140	7	2300	16	31	0
1	0.863	24	17	0.02	53.8	0.4	0	7100	63000	410	37	7700	6	33	0
1	0.89	26.5	18	0.022	53.7	0.4	35	5800	47000	130	95	4800	7	270	0
1.5	0.874	19	49	0.508	29.1	3.7	170	3300	54000	320	26	5800	14	41	0
1.5	0.875	16.5	63	0.94	21.8	4.7	57	14000	52000	170	3	4300	3	0	0
1.5	0.877	18	50	0.491	21.1	3.1	53	13000	51000	130	3	4100	2	0	0
1.5	0.887	18	54	0.426	23.1	2.8	0	16000	53000	77	0	570	0	0	0
1.5	0.884	19.5	51	0.329	28.7	3.7	0	17000	81000	71	0	530	0	0	0
1.5	0.878	23	30	0.18	39.1	2.8	23	11000	45000	120	1	1700	0	0	0
1	0.877	30	25	0.026	42.3	1.7	0	16000	54000	110	1	1200	11	0	0
0.5	0.868	37	12	0.012	61	0.32	0	6100	19000	8	0	12	0	0	0
1	0.868	43	11	0.011	65	0.15	0	2500	6700	7	0	17	0	0	0
1	0.873	28	11	0.048	56	1.7	0	3200	21000	13	0	35	0	0	0
2	0.852	14	41	0.522	21.6	3.7	21	13000	51000	230	17	2400	8	12	0
2	0.852	16	28	0.288	41	3.7	17	14000	39000	210	15	2300	7	8	0
4.5	0.853	24	27	0.094	45.9	2.6	0	10900	52600	155	29	2770	12	68	0
1.5	0.854	20	28	0.196	37.3	1.8	0	9700	36700	94	2	2734	0	3	0
1	0.869	24	38	0.244	26.7	1.2	0	5900	47900	230	78	2227	16	304	0
1.5	0.852	23.5	20	0.099	50.8	1.7	0	14100	55900	133	6	3655	3	5	0
1	0.885	27.5	33	0.025	35.7	0.7	0	17000	51000	77	3	1100	7	7	0
1	0.852	26	31	0.066	39.9	1.1	0	18000	52000	76	3	940	6	7	0
1.5	0.863	21.5	23	0.176	48.2	2.7	0	15000	58000	130	7	1800	4	12	0
1	0.851	24.5	40	0.087	25.5	1.2	0	16000	57000	110	3	1700	3	7	0
2	0.874	19.5	19	0.221	53.1	3.7	0	14000	61000	130	18	1400	5	37	0
1.5	0.881	21.5	31	0.253	41.4	2.8	0	18000	71000	130	21	2100	11	78	0
1	0.873	28	24	0.064	49.6	1.7	0	9200	56000	110	1	1800	1	0	0
1	0.873	27	21	0.122	47.7	1.1	0	8600	29300	27	0	189	0	0	0
1	0.855	25	24	0.087	45.8	1.6	0	8400	33900	27	1	194	0	2	0
0.5	0.85	29	26	0.035	42.5	1.2	0	9800	27700	15	0	156	0	0	0
1	0.861	32	21	0.032	35.5	0.7	0	18000	42900	29	0	191	1	0	0
1	0.872	27.5	20	0.074	49.9	1.7	0	11100	36400	43	0	196	0	0	0

Cor	Densidade	Tensão Interfacial	Teor de Água	Índice de Neutralização	Rigidez Dielétrica	Fator de Potência	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
2	0.883	16	7	0.638	68	5.4	0	4100	28000	27	0	38	0	0	0
1.5	0.873	26	11	0.12	64	2.9	0	5100	27000	31	0	41	0	0	0
1.5	0.881	21	14	0.28	57	3.4	0	4800	28000	25	0	37	0	0	0
1.5	0.869	23	8	0.17	60	1.9	0	5300	13800	11	0	22	0	0	0
1.5	0.85	22	12	0.21	60	2.8	0	2500	6700	7	0	17	0	0	0
1	0.854	30	9	0.088	68	1.7	0	1700	6300	4	0	20	0	0	0
1.5	0.882	20	11	0.17	63	2.3	0	7100	25000	15	0	37	0	0	0
1	0.877	24	57	0.135	26.5	1.6	37	7200	58000	140	17	6700	15	48	0
1	0.876	23.5	17	0.061	53	1.7	13	4100	49000	180	21	4700	8	17	0
2	0.879	23	18	0.2	51.3	2.8	27	11000	55000	210	32	4200	17	110	0
1	0.864	27	57	0.087	24.6	1.8	35	7100	56000	130	21	7600	14	47	0
1.5	0.872	23	19	0.248	49.1	2.1	31	10500	56000	180	37	4100	21	130	0
1.5	0.892	25.5	23	0.07	46.8	2.1	25	9100	58000	180	47	4100	18	120	0
2.5	0.879	16.5	25	0.586	46.1	4.1	28	14000	52000	140	4	2900	10	1	35
2.5	0.876	15.5	75	0.892	22.4	3.8	37	12000	44000	180	7	2900	17	43	0
1.5	0.878	18.5	31	0.409	35.7	3.7	31	13000	43000	170	5	2800	14	39	0
1	0.878	20	73	0.275	19.4	3.8	47	15000	45000	150	2	2800	12	15	0
1.5	0.874	19.5	59	0.182	20.3	3.1	36	16000	46000	140	2	2800	7	12	0
1.5	0.851	20	41	0.238	26.9	2.8	27	12000	42000	160	5	2900	13	37	0
1.5	0.848	24.5	32	0.108	36.6	1.8	97	7200	63000	170	42	2800	7	140	0
1.5	0.886	21	25	0.184	42.3	2.3	93	6100	62000	180	46	2500	6	130	0
0.5	0.869	38.5	11	0.041	60	0.31	15	15000	51000	88	4	1200	3	2	0
0.5	0.872	40	10	0.02	61	0.02	12	16000	52000	110	2	1300	3	0	0
0.5	0.865	31.5	19	0.028	51.2	0.7	17	17000	51000	87	1	1400	4	0	0
2	0.877	17.5	21	0.603	50.5	3.7	37	15000	45000	130	2	2900	6	1	5
1.5	0.881	21.5	19	0.141	44.1	1.8	37	12000	46000	240	12	4800	7	13	0
2.5	0.881	17.5	38	0.349	42.1	2.8	71	9100	59000	320	27	4800	27	38	13
2	0.881	19	39	0.296	52.5	3.1	76	7200	53000	280	21	4500	35	37	11
2	0.881	15	69	1.192	47.2	4.1	77	8200	54000	310	18	4900	38	32	16
1.5	0.888	17.5	79	0.533	11.6	3.8	71	12000	58000	280	21	4300	7	31	0
3	0.887	16.5	24	0.515	51.7	3.7	79	11000	57000	270	27	4200	5	28	0
1.5	0.873	21.5	26	0.113	53	2.6	41	12000	48000	240	12	4700	7	8	0
3.5	0.884	17	23	0.348	50.2	3.3	47	16000	55000	180	3	3700	7	15	0
1.5	0.888	19	20	0.219	52.3	3.2	71	15000	58000	160	2	3700	7	13	0
1.5	0.888	19	29	0.281	51.9	2.7	53	14000	56000	150	3	3300	6	3	0
1	0.872	26.5	67	0.094	13.8	1.8	31	13000	45000	230	8	4900	6	7	0
1	0.85	22	30	0.054	45.1	1.7	0	16000	49000	220	12	3500	1	3	0
2.5	0.879	20	94	0.448	17.5	4.1	250	13000	51000	310	61	7300	23	140	0
2	0.88	16.5	70	0.628	24.3	3.7	280	12000	56000	280	67	6700	23	180	0
1.5	0.865	17	22	0.18	48	4.5	16	14400	69800	292	3	2698	3	1	0
1	0.866	26.5	28	0.088	37	2.4	0	20400	71000	155	2	5899	2	0	0
1.5	0.871	21.5	21	0.11	48	3.1	22	12800	73300	256	14	6422	8	16	0
1	0.872	25	16	0.059	53	2.7	0	17600	66300	159	1	3465	2	0	0
1.5	0.869	23	14	0.026	55	3.1	77	9500	69600	206	149	3737	16	327	0
0.5	0.85	31	18	0.012	53	0.8	18	10700	74400	101	17	2583	1	16	0
1	0.85	28	21	0.015	49	1.3	0	11600	75600	79	64	1594	5	96	0
0.5	0.865	30.5	14	0.015	56	1.1	32	16800	70400	209	9	3360	0	2	0
0.5	0.867	30	23	0.015	49	1.1	17	17100	71700	121	6	2265	1	1	0
1.5	0.873	24.5	28	0.072	49	2.1	22	13100	68600	186	67	2786	11	110	0

Cor	Densidade	Tensão Interfacial	Teor de Água	Índice de Neutralização	Rigidez Dielétrica	Fator de Potência	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
1.5	0.874	22.5	25	0.13	41	2.1	70	12900	54900	245	6	8910	8	5	0
1	0.865	31	31	0.048	32	2.1	0	18900	69600	109	16	2902	1	0	0
3	0.879	16.5	31	0.33	32	4.6	0	18100	67200	165	25	6677	19	3	0
3	0.879	17.5	37	0.3	28	4.7	15	16500	60700	236	16	6497	2	1	0
1.5	0.87	23	62	0.078	14	3.5	80	7300	70200	147	131	7619	34	518	0
1.5	0.892	22	61	0.072	17	3.1	52	12900	62400	142	63	1739	7	222	0
1.5	0.865	32.5	46	0.033	21	2.7	0	14000	60400	170	2	2864	1	0	0
1.5	0.878	27	48	0.058	22	2.8	0	19000	74400	152	3	8720	3	1	0
1.5	0.865	32.5	40	0.028	26	2.1	0	14400	62600	292	11	3094	2	2	0
1.5	0.865	31	33	0.028	31	2.2	0	17000	61000	120	12	3400	1	0	0
4	0.884	20	16	0.493	57.9	3.1	71	13000	42000	260	3	5800	16	3	71
4	0.884	18.5	38	0.677	22.8	3.7	71	12000	43000	260	12	5400	17	3	77
3.5	0.882	19	17	0.455	57.7	4.7	31	12000	31000	230	7	3500	13	4	21
3	0.881	17.5	16	0.299	55	3.1	77	17000	52000	270	16	3100	15	15	31
4.5	0.884	19.5	26	0.346	41.3	7.1	61	12000	63000	280	18	3700	16	17	31
3.5	0.882	18.5	18	0.495	51.8	4.2	71	13000	57000	250	4	3900	15	18	32
3	0.884	17.5	27	0.393	46.4	4.7	76	14000	45000	310	17	3600	11	12	23
4	0.882	18	16	0.493	50.6	4.8	48	11000	41000	250	5	5600	14	3	71
3	0.881	19	16	0.298	50.2	2.7	21	15000	51000	210	7	3100	13	11	18
3	0.881	19.5	17	0.278	55.6	3.1	27	15000	31000	310	7	3100	13	12	15
3	0.881	19	24	0.271	48	4.1	25	14000	33000	210	4	3400	11	4	27
2	0.878	19	18	0.299	50.4	3.1	23	17000	56000	130	12	1400	3	13	0
1.5	0.878	17	25	0.345	42.8	2.8	16	16000	45000	120	15	1700	3	17	0
0.5	0.85	32.5	20	0.056	49.9	0.7	77	4100	38000	550	21	7100	3	17	0
1.5	0.878	18	33	0.368	39.1	2.7	17	17000	42000	120	13	1700	3	21	0
1.5	0.881	18	18	0.181	53.5	2.3	18	18000	44000	110	8	1800	2	21	0
0.5	0.85	31	16	0.038	54.7	1.7	11	7200	46000	130	13	1700	2	11	0
1.5	0.883	22.5	18	0.049	52.5	2.2	37	7700	61000	320	51	3700	7	71	0
1.5	0.876	15	21	0.23	49.4	4.1	17	14000	55000	180	21	1800	12	63	0
0.5	0.852	30	24	0.03	48	0.7	120	13000	41000	210	13	3600	7	7	0
2.5	0.891	21.5	16	0.216	50.9	3.7	35	9700	63000	310	43	3200	8	97	0
1	0.85	23.5	25	0.108	46.8	2.1	17	8700	61000	220	24	3100	7	31	0
1	0.877	30	16	0.052	49.5	2.1	110	13000	37000	210	21	2800	7	16	0
1.5	0.881	19.5	28	0.173	37.7	3.1	31	17000	51000	230	31	2400	11	51	0
2	0.883	18.5	17	0.252	53.5	3.7	27	17000	57000	210	31	2300	12	61	0
3	0.881	18	32	0.416	38.3	4.1	16	16000	51000	190	27	1800	7	76	0
1.5	0.874	18.5	23	0.14	47.3	3.1	16	12000	53000	230	17	1800	7	37	0
3	0.881	18	19	0.356	49.8	4.1	16	11000	52000	230	13	2100	11	13	0
2.5	0.845	16.5	20	0.804	51.1	7.1	29	11000	42000	230	31	2700	7	41	0
2	0.881	19	28	0.254	48.7	3.7	21	12000	58000	140	21	1800	7	71	0
1	0.867	19.5	26	0.236	43.3	3.1	31	13000	62000	210	21	2100	7	51	0
1	0.878	18	19	0.158	50.4	2.7	16	16000	52000	140	18	1400	14	67	0
1.5	0.875	19	26	0.26	43.5	2.7	17	10000	51000	210	21	2200	8	40	0
2	0.878	18	24	0.324	49.4	2.8	17	13000	61000	130	17	1700	4	63	0
1.5	0.877	33	18	0.024	54.3	1.7	120	11000	37000	170	21	3800	7	16	0
1.5	0.879	18.5	18	0.133	56.5	3.3	17	11000	45000	180	21	1800	14	73	0
2	0.883	19	27	0.221	47	3.1	27	12000	46000	210	32	2100	15	61	0
1.5	0.88	21	20	0.141	52	2.8	37	12000	46000	210	21	2300	13	71	0
1.5	0.878	18	25	0.344	48.4	3.7	27	11000	45000	230	31	2100	12	87	0

Cor	Densidade	Tensão Interfacial	Teor de Água	Índice de Neutralização	Rigidez Dielétrica	Fator de Potência	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
1	0.868	25	18	0.099	50.3	1.1	31	18000	51000	160	13	1600	8	2	0
1	0.863	26.5	23	0.08	46.2	0.8	0	17000	37000	110	2	2700	4	1	0
0.5	0.863	33	71	0.037	8.7	0.3	5800	5400	46000	170	420	1500	540	55	2100
0.5	0.849	30	18	0.021	57.3	0.3	110	11000	45000	280	3	2100	2	2	0
1	0.866	25	25	0.094	43.9	1.2	37	17000	39000	110	2	2500	1	0	0
1	0.868	31	30	0.057	34.8	1.3	6100	16000	52000	110	8	1700	5	9	0
1	0.875	27	71	0.053	16.9	1.7	580	13000	44000	150	27	760	36	2	420
0.5	0.865	35.5	27	0.033	40.6	1.1	740	12000	42000	75	28	710	35	1	640
1	0.876	26	30	0.088	37.8	1.7	82	12000	47000	320	51	4800	5	82	0
1	0.863	32.5	32	0.045	33.6	1.1	62	15000	41000	180	8	3200	12	1	17
1.5	0.872	25.5	24	0.07	43	2.1	46	16000	49000	220	4	1500	25	4	0
1.5	0.889	19	20	0.15	50	3.3	36	3200	65000	170	160	6200	38	540	0
1	0.868	19.5	39	0.15	22	3.1	0	16000	45000	53	0	1100	3	0	0
1	0.852	32	35	0.049	28	1.1	1700	3100	29000	170	5700	2300	5300	4100	0
0.5	0.85	37	18	0.027	51	0.5	0	24100	57800	78	1	880	0	0	0
1	0.879	24.5	38	0.046	29.6	0.8	29	6400	42400	47	1	728	0	0	0
2	0.874	27.5	20	0.069	56.9	2.6	95	1400	63200	648	19	8432	28	12	0
1	0.872	28	51	0.055	23	2.1	20	1900	45500	138	61	1656	8	86	0
2	0.874	29.5	22	0.068	46.1	2.6	143	1068	47200	847	25	7839	16	14	0
3	0.873	20	21	0.27	47.3	3.7	0	2800	35100	415	34	4062	5	18	0
1	0.863	19	16	0.15	61.1	3.2	27	12000	53000	110	3	800	3	17	0
1	0.867	30.5	24	0.035	42.7	1.3	91	1500	33300	299	22	6498	3	42	0
0.5	0.867	36	21	0.013	56.6	0.5	0	19900	51400	55	1	808	0	0	0
0.5	0.87	35.5	18	0.013	57.7	0.4	17	3700	58000	310	87	4500	13	140	0
1	0.874	28	16	0.035	60.6	1.2	27	18000	54000	120	16	3900	42	0	0
1	0.874	28.5	23	0.016	50	1.1	23	6100	67000	130	45	2200	52	210	0
0.5	0.874	30	24	0.055	49.8	0.7	21	16000	41000	170	21	1200	3	81	0
1.5	0.854	25	25	0.06	47.5	2.2	26	11000	52000	170	110	4200	12	270	0
1.5	0.878	29.5	41	0.108	22	2.1	27	11000	61000	130	77	4100	11	230	0
1	0.854	24	26	0.081	46.7	1.2	27	12000	58000	140	14	2600	28	38	0
2	0.875	23	25	0.115	40.8	3.1	47	16000	62000	210	12	3300	17	27	0
0.5	0.852	30	24	0.024	42.9	0.5	47	12000	51000	140	37	1300	140	76	0
0.5	0.852	32.5	24	0.022	47.6	0.4	41	14000	57000	110	47	1300	150	71	0
2	0.852	25.5	32	0.121	37.3	2.8	410	8700	58000	870	150	6500	2300	2100	1500
1.5	0.852	26	21	0.091	51	2.1	770	5700	41000	270	3100	2700	4300	5100	21
5	0.852	34	18	0.032	55.8	0.7	11	16000	52000	78	3	760	0	0	0
0.5	0.865	34	31	0.024	39.5	0.6	13	17000	52000	71	2	740	0	0	0
1.5	0.88	22	34	0.163	32	2.4	31	11000	51000	160	3	2000	2	2	0
1.5	0.883	20	23	0.302	49.7	2.7	33	14000	61000	150	2	2100	1	0	0
0.5	0.867	35	18	0.03	52.7	0.8	0	14000	53000	77	1	810	0	0	0
0.5	0.87	35.5	23	0.011	48.5	0.8	0	17000	51000	67	2	750	0	0	0
1.5	0.856	20.5	20	0.127	50.8	3.1	12	16000	58000	120	3	2400	1	6	0
1.5	0.855	21.5	16	0.077	52.7	2.2	12	12000	52000	170	13	3700	2	15	0
1	0.857	30	15	0.021	51.1	0.7	0	12000	51000	180	15	3200	2	17	0
0.5	0.864	34	16	0.016	55.2	1	0	16000	56000	210	2	2200	0	3	0
1	0.872	34.5	24	0.044	43.6	1.1	0	17000	53000	180	5	2300	0	2	0
1.5	0.874	26.5	23	0.107	46.4	2.1	17	16000	62000	210	13	2700	12	17	0
0.5	0.868	36.5	21	0.016	47.8	0.7	7	14000	51000	110	2	2600	7	3	0
0.5	0.868	36	15	0.016	55.7	0.5	0	16000	52000	61	1	930	1	0	0

Cor	Densidade	Tensão Interfacial	Teor de Água	Índice de Neutralização	Rigidez Dielétrica	Fator de Potência	H2	O2	N2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
0.5	0.864	35	16	0.015	58.4	0.6	0	12000	41000	55	1	920	2	0	0
1.5	0.878	31.5	17	0.037	51.3	1.7	17	16000	51000	210	18	2400	13	27	0
1.5	0.855	24	12	0.08	54.2	2.3	15	12000	42000	180	12	1800	8	12	0
1.5	0.869	23	14	0.096	59.8	2.8	12	11000	61000	230	8	1800	11	13	0
2.5	0.886	23.5	28	0.125	40.1	3.5	37	11000	49000	170	21	1400	5	61	0
1.5	0.876	31	26	0.028	44.4	1.2	37	11000	48000	150	27	1400	5	43	0

4.3 SISTEMAS FUZZY PARA ESTIMAÇÃO INICIAL DOS GASES DISSOLVIDOS NO OMI

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos com os sistemas fuzzy dedicados à estimação inicial da concentração dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante.

Importante reforçar que os valores utilizados para o cálculo do erro quadrático médio não estão normalizados, com isso os valores dos erros terão valores elevados. Isso será observado na análise de todos os gráficos tanto na estimação inicial quanto na estimação aprimorada.

4.3.1 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO INICIAL DO GÁS HIDROGÊNIO (H₂)

O sistema fuzzy para estimação inicial da concentração do gás hidrogênio foi ajustado tal como apresentado no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura 4.2. Na Figura 4.3 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. Tem-se nessa figura a linha tracejada a qual indica o relacionamento ideal, pode-se observar que os dados estimados se concentram próximos aos dados reais, uma vez que grande parte dos pontos em vermelhos encontram-se próximos à linha tracejada. O ponto que está muito afastado da linha tracejada será melhor aproximado durante o processo de refinamento do sistema fuzzy.

Figura 4.2 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa inicial do H_2 .

Figura 4.3 – Comparação inicial entre os dados desejados e os estimados referentes ao H_2 .

A função densidade probabilidade inicial acumulada para o erro de estimação do H_2 é graficamente apresentada por meio da Figura 4.4. Analizando o gráfico é possível observar que 80% dos dados estão com erro (diferença entre valor real e valor estimado) zero ou inferior.

Figura 4.4 – Função densidade probabilidade inicial para o erro de estimação do H_2 .

4.3.2 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO INICIAL DO GÁS OXIGÊNIO (O_2)

O sistema fuzzy para estimação inicial da concentração do gás oxigênio foi ajustado tal como apresentado no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura 4.5. Na Figura 4.6 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. Novamente a linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. Neste caso, pode-se observar que os dados concentram-se, em sua maioria, variando de 5000 a 20000 ppm.

Figura4.5 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa inicial do O₂.

Figura4.6 – Comparação inicial entre os dados desejados e os estimados referentes ao O₂.

A função densidade probabilidade inicial acumulada para o erro de estimação do O₂ é graficamente apresentada por meio da Figura4.7. Analizando o gráfico é possível

observar que 50% dos dados estão com erro (diferença entre valor real e valor estimado) zero ou inferior.

Figura4.7 – Função densidade probabilidade inicial para o erro de estimação do O₂.

4.3.3 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO INICIAL DO GÁS NITROGÊNIO (N₂)

O sistema fuzzy para estimação inicial da concentração do gás nitrogênio foi ajustado tal como apresentado no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura4.8. Na Figura4.9 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. Pode-se observar que o pontos vermelhos estão concentrados próximos à linha tracejada, indicando um resultado satisfatório.

Figura4.8 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa inicial do N_2 .

Figura4.9 – Comparação inicial entre os dados desejados e os estimados referentes ao N_2 .

A função densidade probabilidade inicial acumulada para o erro de estimação do N_2 é graficamente apresentada por meio da Figura4.10. Analizando o gráfico é possível observar que 50% dos dados estão com erro (diferença entre valor real e valor estimado) zero ou inferior.

Figura4.10 – Função densidade probabilidade inicial para o erro de estimação do N_2 .

4.3.4 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO INICIAL DO MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

O sistema fuzzy para estimação inicial da concentração do gás monóxido de carbono foi ajustado tal como apresentado no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura4.11. Na Figura4.12 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. Neste caso, pode-se observar que os dados concentram-se, em sua maioria, variando de 0 a 400 ppm.

Figura4.11 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa inicial do CO.

Figura4.12 – Comparação inicial entre os dados desejados e os estimados referentes ao CO.

A função densidade probabilidade inicial acumulada para o erro de estimação do CO é graficamente apresentada por meio da Figura4.13. Analizando o gráfico é possível

observar que 55% dos dados estão com erro (diferença entre valor real e valor estimado) zero ou inferior.

Figura4.13 – Função densidade probabilidade inicial para o erro de estimação do CO.

4.3.5 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO INICIAL DO METANO (CH₄)

O sistema fuzzy para estimação inicial da concentração do gás metano foi ajustado tal como apresentado no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura4.14. Na Figura4.15 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. Novamente um resultado satisfatório, uma vez que todos os pontos estão muito próximos à linha referência.

Figura4.14 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa inicial do CH₄.

Figura4.15 – Comparação inicial entre os dados desejados e os estimados referentes ao CH₄.

A função densidade probabilidade inicial acumulada para o erro de estimação do CH₄ é graficamente apresentada por meio da Figura4.16. Analizando o gráfico é possível

observar que 85% dos dados estão com erro (diferença entre valor real e valor estimado) zero ou inferior.

Figura4.16 – Função densidade probabilidade inicial para o erro de estimação do CH_4 .

4.3.6 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO INICIAL DO DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2)

O sistema fuzzy para estimação inicial da concentração do gás dióxido de carbono foi ajustado tal como apresentado no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura4.17. Na Figura4.18 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada.

Figura4.17 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa inicial do CO₂.

Figura4.18 – Comparação inicial entre os dados desejados e os estimados referentes ao CO₂.

A função densidade probabilidade inicial acumulada para o erro de estimação do CO₂ é graficamente apresentada por meio da Figura4.19. Analizando o gráfico é possível

observar que 55% dos dados estão com erro (diferença entre valor real e valor estimado) zero ou inferior.

Figura4.19 – Função densidade probabilidade inicial para o erro de estimativa do CO₂.

4.3.7 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO INICIAL DO ETILENO (C₂H₄)

O sistema fuzzy para estimativa inicial da concentração do gás etileno foi ajustado tal como apresentado no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio daFigura4.20. Na Figura4.21 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada.

Figura4.20 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa inicial do C_2H_4 .

Figura4.21 – Comparação inicial entre os dados desejados e os estimados referentes ao C_2H_4 .

A função densidade probabilidade inicial acumulada para o erro de estimação do C_2H_4 é graficamente apresentada por meio da Figura4.22. Analizando o gráfico é possível

observar que 90% dos dados estão com erro (diferença entre valor real e valor estimado) zero ou inferior.

Figura4.22 – Função densidade probabilidade inicial para o erro de estimação do C_2H_4 .

4.3.8 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO INICIAL DO ETANO (C_2H_6)

O sistema fuzzy para estimação inicial da concentração do gás etano foi ajustado tal como apresentado no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio daFigura4.23. Na Figura4.24 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada.

Figura4.23 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa inicial do C_2H_6 .

Figura4.24 – Comparação inicial entre os dados desejados e os estimados referentes ao C_2H_6 .

A função densidade probabilidade inicial acumulada para o erro de estimação do C_2H_6 é graficamente apresentada por meio da Figura4.25. Analizando o gráfico é possível

observar que 80% dos dados estão com erro (diferença entre valor real e valor estimado) zero ou inferior.

Figura4.25 – Função densidade probabilidade inicial para o erro de estimativa do C_2H_6 .

4.3.9 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO INICIAL DO ACETILENO (C_2H_2)

O sistema fuzzy para estimativa inicial da concentração do gás acetileno foi ajustado tal como apresentado no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio daFigura4.20. Na Figura4.21 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada.

Figura4.26 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa inicial do C_2H_2 .

Figura4.27 – Comparação inicial entre os dados desejados e os estimados referentes ao C_2H_2 .

A função densidade probabilidade inicial acumulada para o erro de estimação do C_2H_2 é graficamente apresentada por meio da Figura4.28. Analizando o gráfico é possível

observar que 90% dos dados estão com erro (diferença entre valor real e valor estimado) zero ou inferior.

Figura4.28 – Função densidade probabilidade inicial para o erro de estimação do C_2H_2 .

4.4 SISTEMAS FUZZY PARA ESTIMAÇÃO APRIMORADA DOS GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO MINERAL ISOLANTE

4.4.1 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO APRIMORADA DO GÁS HIDROGÊNIO (H_2)

O sistema fuzzy para estimação refinada da concentração do gás hidrogênio segue o mesmo princípio da estimação inicial descrito no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura4.29. Na Figura4.30 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. O refinamento reduziu o erro quando comparado à estimação inicial.

Figura4.29 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa aprimorada do H_2 .

Figura4.30 – Comparação aprimorada entre os dados desejados e os estimados referentes ao H_2 .

A função densidade probabilidade aprimorada acumulada para o erro de estimação do H_2 é graficamente apresentada por meio da Figura4.31. Analizando o gráfico é possível observar que 75% dos dados estão com erro zero ou inferior.

Figura4.31 – Função densidade probabilidade aprimorada para o erro de estimação do H₂.

4.4.2 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO APRIMORADA DO GÁS OXIGÊNIO (O₂)

O sistema fuzzy para estimação refinada da concentração do gás oxigênio segue o mesmo princípio da estimação inicial descrito no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura4.32. Na Figura4.33 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. Novamente o refinamento reduziu o erro quando comparado à estimação inicial.

Figura4.32 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa aprimorada do O₂.

Figura4.33 – Comparação aprimorada entre os dados desejados e os estimados referentes ao O₂.

A função densidade probabilidade aprimorada acumulada para o erro de estimação do O_2 é graficamente apresentada por meio da Figura4.34. Analizando o gráfico é possível observar que 50% dos dados estão com erro zero ou inferior.

Figura4.34 – Função densidade probabilidade aprimorada para o erro de estimação do O_2 .

4.4.3 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO APRIMORADA DO GÁS NITROGÊNIO (N_2)

O sistema fuzzy para estimação refinada da concentração do gás nitrogênio segue o mesmo princípio da estimação inicial descrito no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura4.35. Na Figura4.36 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. O refinamento reduziu o erro quando comparado à estimação inicial.

Figura4.35 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa aprimorada do N₂.

Figura4.36 – Comparação aprimorada entre os dados desejados e os estimados referentes ao N₂.

A função densidade probabilidade aprimorada acumulada para o erro de estimação do N_2 é graficamente apresentada por meio da Figura4.37. Analizando o gráfico é possível observar que 50% dos dados estão com erro zero ou inferior.

Figura4.37 – Função densidade probabilidade aprimorada para o erro de estimação do N_2 .

4.4.4 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO APRIMORADA DO MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

O sistema fuzzy para estimação refinada da concentração do gás monóxido de carbono segue o mesmo princípio da estimação inicial descrito no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura4.38. Na Figura4.39 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. O refinamento reduziu o erro quando comparado à estimação inicial.

Figura4.38 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa aprimorada do CO.

Figura4.39 – Comparação aprimorada entre os dados desejados e os estimados referentes ao CO.

A função densidade probabilidade aprimorada acumulada para o erro de estimação do CO é graficamente apresentada por meio da Figura4.40. Analizando o gráfico é possível observar que 60% dos dados estão com erro zero ou inferior.

Figura4.40 – Função densidade probabilidade aprimorada para o erro de estimação do CO.

4.4.5 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO APRIMORADA DO METANO (CH₄)

O sistema fuzzy para estimação refinada da concentração do gás metano segue o mesmo princípio da estimação inicial descrito no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura4.29. Na Figura4.30 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. O refinamento reduziu o erro quando comparado à estimação inicial.

Figura4.41 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa aprimorada do CH₄.

Figura4.42 – Comparação aprimorada entre os dados desejados e os estimados referentes ao CH₄.

A função densidade probabilidade aprimorada acumulada para o erro de estimação do CH₄ é graficamente apresentada por meio da Figura4.43. Analizando o gráfico é possível observar que 80% dos dados estão com erro zero ou inferior.

Figura4.43 – Função densidade probabilidade aprimorada para o erro de estimação do CH₄.

4.4.6 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO APRIMORADA DO DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

O sistema fuzzy para estimação refinada da concentração do gás dióxido de carbono segue o mesmo princípio da estimação inicial descrito no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura4.29. Na Figura4.30 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. O refinamento reduziu o erro quando comparado à estimação inicial.

Figura4.44 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa aprimorada do CO₂.

Figura4.45 – Comparação aprimorada entre os dados desejados e os estimados referentes ao CO₂.

A função densidade probabilidade aprimorada acumulada para o erro de estimação do CO₂ é graficamente apresentada por meio da Figura4.46. Analizando o gráfico é possível observar que 55% dos dados estão com erro zero ou inferior.

Figura4.46 – Função densidade probabilidade aprimorada para o erro de estimação do CO₂.

4.4.7 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO APRIMORADA DO ETILENO (C₂H₄)

O sistema fuzzy para estimação refinada da concentração do gás etileno segue o mesmo princípio da estimação inicial descrito no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura4.29. Na Figura4.30 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. O refinamento reduziu o erro quando comparado à estimação inicial.

Figura 4.47 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa aprimorada do C_2H_4 .

Figura 4.48 – Comparação aprimorada entre os dados desejados e os estimados referentes ao C_2H_4 .

A função densidade probabilidade aprimorada acumulada para o erro de estimação do C_2H_4 é graficamente apresentada por meio da Figura 4.49. Analizando o gráfico é possível observar que 75% dos dados estão com erro zero ou inferior.

Figura 4.49 – Função densidade probabilidade aprimorada para o erro de estimação do C_2H_4 .

4.4.8 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO APRIMORADA DO ETANO (C_2H_6)

O sistema fuzzy para estimação refinada da concentração do gás etano segue o mesmo princípio da estimação inicial descrito no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura 4.29. Na Figura 4.30 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. O refinamento reduziu o erro quando comparado à estimação inicial.

Figura 4.50 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa aprimorada do C_2H_6 .

Figura 4.51 – Comparação aprimorada entre os dados desejados e os estimados referentes ao C_2H_6 .

A função densidade probabilidade aprimorada acumulada para o erro de estimação do C_2H_6 é graficamente apresentada por meio da Figura 4.52. Analizando o gráfico é possível observar que 70% dos dados estão com erro zero ou inferior.

Figura 4.52 – Função densidade probabilidade aprimorada para o erro de estimação do C₂H₆.

4.4.9 SISTEMA FUZZY PARA ESTIMAÇÃO APRIMORADA DO ACETILENO (C₂H₂)

O sistema fuzzy para estimação refinada da concentração do gás acetileno segue o mesmo princípio da estimação inicial descrito no Capítulo 3. O comportamento do erro quadrático médio ao longo das iterações do processo de ajuste é apresentado por meio da Figura 4.29. Na Figura 4.30 apresenta-se como a concentração estimada se comporta em função da concentração desejada. A linha tracejada indicando o relacionamento ideal entre as concentrações real e estimada. O refinamento reduziu o erro quando comparado à estimação inicial.

Figura 4.53 – Erro quadrático médio para o ajuste do sistema fuzzy de estimativa aprimorada do C_2H_2 .

Figura 4.54 – Comparação aprimorada entre os dados desejados e os estimados referentes ao C_2H_2 .

A função densidade probabilidade aprimorada acumulada para o erro de estimação do C_2H_2 é graficamente apresentada por meio da Figura 4.55. Analizando o gráfico é possível observar que 90% dos dados estão com erro zero ou inferior.

Figura 4.55 – Função densidade probabilidade aprimorada para o erro de estimação do C_2H_2 .

4.5 CONSIDERAÇÕES REFERENTES AO EMPREGO DA ESTIMAÇÃO DE GASES NA DETERMINAÇÃO DA CONDIÇÃO OPERATIVA DE TRANSFORMADORES

Neste trabalho o mapeamento *fuzzy* dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante será avaliado considerando-se a capacidade dos resultados alcançados em identificarem a condição do transformador. Para tanto será empregado o critério IEEE o qual é apresentado por meio da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Critérios do método IEEE para identificação de defeitos em transformadores.

Condição	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
1	100	120	35	50	65	250	2500	720
2	101-700	121-400	36-50	51-100	66-100	251-570	2501-4000	721-1920
3	701-1800	401-1000	51-80	101-200	101-150	571-1400	4001-10000	1921-4630
4	>1800	>1000	>80	>200	>150	>1400	>10000	>4630

Na Tabela 4.2a Condição 1 se refere a uma condição de operação normal, ou seja, se os gases dissolvidos encontram-se em níveis inferiores aos apresentados tem-se um indicativo de que o transformador está operando corretamente. A Condição 2 indica uma

possível falha edeve-se retirar amostras frequentes de óleo mineral para determinar a tendência de crescimentodos gases. A Condição 3 indica nível alto de decomposição de celulose e/ou óleo mineral eprovavelmente há uma falha no transformador. Na condição 4 tem-se uma indicação decomposição excessiva de celulose e/ou óleo mineral. A operação contínua na Condição 4 pode resultar em falhas do transformador.

A comparação entre as codições dos transformadores entre os dados reais e os dados estimados tando da estimativa inicial quanto da estimativa aprimorada. Comparando os dados reais com a estimativa inicial constatou-se que há 69 casos de divergências entre os dados reais e os dados estimados. Em 98,5 % dos casos (68 casos) a estimacão modificou a codição do transformador em uma codição, ou seja, se o transformador estivesse operando em condição 1, após a estimacão a condição do transformador seria condição 2. Em 1,5% dos casos (1 caso) a estimacão modificou a codição do transformador em duas codições, ou seja, se o transformador estivesse operando em condição 1, após a estimacão a condição do transformador seria condição 3. Comparando os dados reais com a estimativa aprimorada constatou-se que há 70 casos de divergências entre os dados reais e os dados estimados. Em 91,4 % dos casos (64 casos) a estimacão modificou a codição do transformador em uma codição, ou seja, se o transformador estivesse operando em condição 1, após a estimacão a condição do transformador seria condição 2. Em 8,6% dos casos (6 casos) a estimacão modificou a codição do transformador em duas codições, ou seja, se o transformador estivesse operando em condição 1, após a estimacão a condição do transformador seria condição 3.

O erro absoluto médio, tanto inicial quanto aprimorado, de estimacão da concentração dos gases é apresentado conforme Tabela 4.3. Importante resaltar que para todos os gases os valores aprimorados foram melhores que os valores inciais.

Tabela 4.3 – Erro absoluto médio de estimacão da concentração dos gases.

Estimativa	H2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
Inicial	55	58	34	1178	52	62	8
Aprimorada	32	48	24	922	15	37	6

O erro em ppm médio, tanto inical quanto aprimorado, de estimacão da concentração dos gases é apresentado conforme Tabela 4.4. Novamente os valores aprimorados foram melhores do que valores inciais.

Tabela 4.4 – Erro ppm médio de estimação da concentração dos gases

Estimativa	H2	CO	CH4	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
Inicial	0.07	0.04	0.11	0.13	0.34	0.14	0.46
Aprimorada	0.06	0.03	0.04	0.07	0.27	0.13	0.38

Capítulo 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Cada vez mais as concessionárias de energia elétricas são responsáveis pela qualidade no fornecimento de energia elétrica aos seus clientes. Com isso, tem-se buscado uma constante melhoria nos serviços prestados visando melhorar a robustez do sistema de distribuição de energia elétrico brasileiro. A confiabilidade de um sistema elétrico é aprimorada quando defeitos e falhas incipientes são detectados, evitando, assim, que esses evoluam e resultem em interrupções da operação do sistema em questão.

A detecção de anomalias em componentes de um sistema elétrico pode ser realizada por meio de inspeção visual, da avaliação das grandezas operacionais do componente e, principalmente, por meio de ensaios orientados ao propósito de identificação de falhas. Os transformadores de potência são exemplo de equipamentos onde a identificação de defeitos se baliza em ensaios específicos.

O presente trabalho concentrou-se em fazer a modelagem por meio de sistemas de inferência fuzzy da concentração dos gases dissolvidos em óleo mineral isolante à partir dos resultados de ensaios físico-químicos. Para a estimação dos gases foram utilizados dados provenientes de ensaios físico-químicos realizados em óleo isolante retirados de transformadores em regime.

A técnica desenvolvida permitiu a estimação dos gases presentes no óleo isolante, sem que houvesse necessidade da realização do ensaio cromatográfico, com isso a quantidade de interrupções no fornecimento de energia será consideravelmente reduzido e os custos associados na determinação da concentração dos gases no óleo mineral seguirá a mesma tendência de redução.

Sendo assim, o sistema proposto foi validado por meio de dados reais e os resultados alcançados são compatíveis com aqueles obtidos por meio das técnicas convencionais.

Para trabalhos futuros vinculados ao presente trabalho, pode-se destacar as seguintes linhas de pesquisas:

- Utilização de outros critérios na detecção de defeitos em transformadores de potência;
- Desenvolvimento de um sistema que, a partir dos dados obtidos no presente trabalho, determine o modo de falha correspondente à concentração de cada um dos gases presentes no transformador;
- Implementação de um sistema que monitore constantemente a concentração dos gases em transformadores visando auxiliar o acompanhamento da evolução da concentração dos mesmos.

Referencia bibliográficas e literaturas recomendadas

- ❖ ANSI/IEEE. IEEE guide for interpretation of gases generate in oil-immersed transformers, C57.104-1991. 1991.
- ❖ ANSI/IEEE. IEEE guide for protection of network transformers, C37.108-1989. 1989.
- ❖ BENMAKROUHA, F.; GLORENNEC, P.-Y. Choice of experiments and analysis of approximation accuracy in a Tagaki-Sugeno fuzzy system. In.INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE NORTH AMERICAN FUZZY INFORMATION PROCESSING SOCIETY, 18, 1999, Nova York, Proceedings of 18th International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society, Nova York: 1999. p. 189-192.
- ❖ BEZDEK, J. C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Functions Algorithms. New York: Plenum, 1981.
- ❖ BIRLASEKARAN, S., YU XINGZHOU, FETHERSTONE, F., ABELL, R., MIDDLETON, R., Diagnosis and identification of transformer faults from frequency response data. In. POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 3, 2000, Singapura. Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting, Singapura: 2000. v. 3, p. 1862 – 1867.
- ❖ BORTOLET, P. Modelization et commande multivariable floues: Application a la commande d'un moteur thermique Ph.D. dissertation, Inst. Nat. Sci. Appl., Toulouse, LAAS-CNRS, Dec. 1998.
- ❖ BRASTRAFO DO BRASIL. Serviços em Transformadores. Disponível em: <<http://www.brastrafo.com.br/engcampo.php>> Acesso em: 03 nov. 2004.
- ❖ BURROUGH YAGER R. R, FILEV, D. P. Generation of fuzzy rules by mountain clustering. J. Intell. Fuzzy Syst., v. 2, p. 209-219, 1994.
- ❖ BURROUGH, P. A., VAN GAANS, P. F. M., MACMILLAN, R. A. High-resolution landform classification using fuzzy k-means.” Fuzzy Sets Sysems., v. 113, n. 1, p. 37-52, 2000.
- ❖ CHIU, S. L. Fuzzy model identification based on cluster estimation. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, v. 2, p. 267-278, 1994.
- ❖ DUNN, J. C. A fuzzy relative of the isodata process and its use in detecting compact well-separated clusters, J. Cybern., v. 3, n. 3, p. 32–57, 1973.

- ❖ DUVAL, M., New Techniques for dissolved Gas-in-Oil Analysis, IEEE Electrical Insulation Magazine, 19(2): 16-5, 2003.
- ❖ DUVAL, M., Using gas-in-oil standards to improve accuracy of dissolved gas analysis results and diagnoses, Electricity Today, vol.14, no. 6, p.16, 2002.
- ❖ EMAMI, M. R., TURKSEN, I. B., GOLDENBERG, A. A. Development of a systematic methodology of fuzzy logic modeling. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, v. 6, p. 346–361, 1998.
- ❖ ERNSLEY, A. M., XIAO, X., HEYWOOD, R. J., ALI, M. Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 3: Effects of oxygen and water on ageing in oil. In. IEE SCIENCE AND MEASUREMENT TECHNOLOGY, 3, 2001, xxxxx. Proceedings of IEE Science and Measurement Technology, xxxxx: 2000. p. 115 – 119.
- ❖ FALLOU, B., DAVIES, I., ROGERS, R. R., REYNOLDS, E. H., VIALE, F., DEVAUX, R., FOURNIE, R., GALAND, J., VUARCHEX, P., DORNENBURG, P. Application of physico-chemical methods of analysis to the study of deterioration in the insulation of electrical apparatus, CIGRE, Paper 15-07, 1970.
- ❖ GLORENNEC., P. –Y. Algorithmes d'Apprendissage Pour Systèmes d'inference Floue. Paris, France. Hèrmes, 1999.
- ❖ GOMIDE, F. A. C., GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica nebulosa. Revista Controle e Automação, v. 4, n. 3, p. 97-115, 1994.
- ❖ GRANATO, R. C.; LEVY, N. M.; TULIO, L. Manutenção de transformadores baseada em ensaios físico-químicos e cromatográficos no sistema isolante. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, agosto, 2001, 25p.
- ❖ GUARDADO, J. R., NAREDO, J. L., MORENO, P., FUERTE, C. R. A comparative study of neural network efficiency in power transformers diagnosis using dissolved gas analysis. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 16, n. 4, p. 643 – 647, 2001.
- ❖ GUILLAUME, S. Designing fuzzy inference systems from data: An interpretability review. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, v. 9, n. 3, 2001.
- ❖ HERMAN, H., SHENTON, M. J., STEVENS, G. C., HEYWOOD, R. J. A new approach to condition assessment and lifetime prediction of paper and oil used as transformer insulation. In. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID DIELECTRICS, 7, 2001, Eindhoven. Proceedings of 7th International Conference on Solid Dielectrics, Eindhoven: 2001. p. 473 – 476.

- ❖ HIROTA, K. Industrial Applications of Fuzzy Technology, Springer Verlag., New York, NY, 1993.
- ❖ HOOSHMAND, R., BANEJAD, M., Application of Fuzzy Logic in Fault Diagnosis in Transformers using Dissolved Gas based on Different Standards, Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, vol 17 December 2006 - ISSN 1307-6884.
- ❖ ICHIHASHI, H., SHIRAI, T., NAGASAKA, K., MIYOSHI, T. Neuro-fuzzy id3: A method of inducing fuzzy decision trees with linear programming for maximizing entropy and an algebraic method for incremental learning. Fuzzy Sets Systems, v. 81, p. 157–167, 1996.
- ❖ ISHIBUCHI, H., NOZAKI, K., TANAKA, T., OSAKA, Y., MATSUDA, M. Empirical study on learning in fuzzy systems by rice test analysis. Fuzzy Sets and Systems, v. 64, p. 129-144, 1994.
- ❖ ISHIBUCHI, H., NOZAKI, K., YAMAMOTO, N., TANAKA, H. Selecting fuzzy if-then rules for classification problems using genetic algorithms. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, v. 3, p. 260–270, 1995.
- ❖ ISLAM & LEDWICH BORTOLET, P. Modelization et commande multivariable floues: Application a la commande d'un moteur thermique Ph.D. dissertation, Inst. Nat. Sci. Appl., Toulouse, LAAS-CNRS, Dec. 1998.
- ❖ ISLAM, S. M., LEDWICH, G., Locating transformer faults through sensitivity analysis of high frequency modeling using transfer function approach. In. ELECTRICAL INSULATION, 1996, Montreal. Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal: 1996. v. 1, p. 38 – 41.
- ❖ JONES, S. L., The detection of partial discharges in power transformers using computer aided acoustic emission techniques. In. ELECTRICAL INSULATION, 1990, Toronto. Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal: 1990. p. 106 – 110.
- ❖ LEE, C. C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controllers – Part I and II. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. 20, p. 404-435, 1990.
- ❖ LEE, S. J. et al. “An Intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, USA, v.19, n.2, p.524–532, apr. 2004.
- ❖ LIPSTEIN, R. A.; SHAKNOVICH, M. I. Transformer oil. 2. ed. Jerusalem, Israel: 1970. 275p.

- ❖ MAMDANI, E. H., ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, v. 7, p. 1-13, 1975.
- ❖ MILASCH, M., *Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante*, EFEI, São Paulo: Edgard Blucher Ltda. ,1984
- ❖ MORAIS, R. M. N. de., *Estudo do envelhecimento térmico do papel isolante elétrico*. Rio de Janeiro, 1990. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) - Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- ❖ NOZAKI, K., ISHIBUCHI, H., TANAKA, H. A simple but powerful heuristic method for generating fuzzy rules from numerical data. *Fuzzy Sets and Systems.*, v. 86, p. 251–270, 1997.
- ❖ NYNÄS NAPHTHENICS AB. *Transformer oil handbook*. 1 ed., Sweden: Linderoths in Vingåker, 2004. 223 p
- ❖ OKUBO, H., KOBAYASHI, S., AOSHIMA, Y., TAKAGI, H., MORI, E., IKEDA, M., KISHI, A. Electrical insulation diagnostic method and maintenance criteria for oil-immersed power transformers. In. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIELECTRIC LIQUID*, 13, 1999, Nara. *Proceedings of 13th International Conference on Dielectric Liquid*, Nara: 1999. p. 372 – 377.
- ❖ PEDRYCZ, W., GOMIDE, F. A. C. *An Introduction to Fuzzy Sets – Analysis and Design*, MIT Press, 1998.
- ❖ QUINLAN, J. R. Induction of decision trees. *Mach. Learn.*, v. 1, p. 81–106, 1986.
- ❖ RAMOT, D., FRIEDMAN, M., LANGHOLZ, G., KANDEL, A. Complex fuzzy logic. *IEEE Transactions on Fuzzy Sets*, v. 11, p. 450-461, 2003.
- ❖ ROGER JANG, J. –S., SUN, C. –T, MIZUTANI, E. *Neuro – Fuzzy and Soft Computing* Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1997.
- ❖ ROGER JANG, R. D., *Anfis: Adaptive-network-based fuzzy inference systems*, *Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, v. 23, n. 3, p. 665 – 685, 1993.
- ❖ RUNKLER, T. A., BEZDEK, J. C., Alternating cluster estimation: A new tool for clustering and function approximation. *IEEE Transactions on. Fuzzy Systems.*, v. 7, p. 377–393, 1999.
- ❖ SUGENO, M., KANG, G. T., Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 28, p. 15-33, 1988.
- ❖ SUGENO, M., YASUKAWA, T., A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, v. 1, p. 7–31, 1993.

- ❖ TAGAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T., Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-101, n. 8, p. 2892-2898, 1982.
- ❖ TAKAGI, T., SUGENO, M. Fuzzy identification of system and its application to modeling and control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 15, p. 116-132, 1985.
- ❖ WANG, L.-X., MENDEL, J. M. Generating fuzzy rules by learning from examples, IEEE Transaction on. Systems., Man, Cybernetics., v. 22, p. 1414-1427, 1992.
- ❖ XIE X., BENI. G. A validity measure for fuzzy clustering. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 13, p. 841-847, 1991.
- ❖ YAGER R. R, FILEV, D. P. Generation of fuzzy rules by mountain clustering. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, v. 2, p. 209-219, 1994.
- ❖ ZADEH, L. A., Fuzzy sets, Information and Control, v. 8, p. 29-44, 1965.
- ❖ ZADEH, L. A., Outline of new approach to the analysis of complex systems and decision. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. 3, p. 28-44, 1973.