**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

MARCELO APARECIDO CARRAPATO

**SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY PARA AVALIAÇÃO DE
DEFEITOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA UTILIZANDO ANÁLISES CROMATOGRÁFICAS.**

**SÃO CARLOS
2016**

MARCELO APARECIDO CARRAPATO

**SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY PARA AVALIAÇÃO DE
DEFEITOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA UTILIZANDO ANÁLISES
CROMATOGRÁFICAS.**

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

Área de Concentração em Sistemas Elétricos de
Potência.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino

São Carlos
2016

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

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

A311s Aparecido Carrapato, Marcelo
 Sistema de inferência fuzzy para avaliação de
defeitos elétricos em transformadores de potência
utilizando análises cromatográficas / Marcelo Aparecido
Carrapato; orientador Rogério Andrade Flauzino. São
Carlos, 2016.

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, 2016.

1. Transformadores de potência. 2. Óleo isolante.
3. Sistema fuzzy. 4. Análise cromatográfica. 5.
Identificação de falhas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCELO APARECIDO CARRAPATO**.

Título da dissertação: "Sistema de Inferência Fuzzy para Avaliação de Defeitos Elétricos em Transformadores de Potência Utilizando Análises Cromatográficas".

Data da defesa: 21/11/2016.

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

Aprovado

Prof. Dr. **Falcondes José Mendes de Seixas**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP- Ilha Solteira)

Aprovado

Prof. Dr. **Jorge Luiz e Silva**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/ICMC)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

“Durante nossa breve existência nesse mundo devemos nos ocupar de todos os esforços para que faça sentido nossa vida, senão, seremos apenas mais um ser que um dia existiu nesse mundo” (Alexsandro Rego).“

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Adriana e a meus filhos Victor e Thales por todo apoio, incentivo e compreensão pelas horas em que estive ausente para cumprir esta jornada.

Ao Prof. Rogério Flauzino pelos ensinamentos, pela orientação deste trabalho e pela grande amizade.

Ao Prof. Ivan Nunes da Silva pelos ensinamentos, pela grande ajuda e cooperação, e pela grande amizade.

Aos companheiros de trabalho e de mestrado Eduardo Navarro, Paulo Izidio e Thiago Bonfim que colaboraram e incentivaram minha participação nesta pesquisa acadêmica.

A CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista) pela disponibilidade dos dados de DGA do projeto de P&D ANEEL intitulado Ferramentas Inteligentes Para Diagnósticos em Transformadores de Transmissão Submetidos a Esforços Eletromagnéticos Severos.

À Carlos Guilherme Gonzales e Erasmo Silveira Neto pelas oportunidades de desenvolvimento e ensinamentos trocados ao longo desses anos.

RESUMO

CARRAPATO, M. A. (2015). *Sistema de Inferência Fuzzy Para Avaliação de Defeitos Elétricos em Transformadores de Potência Utilizando Análises Cromatográficas*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

O objetivo deste trabalho de pesquisa foi de fazer a modelagem por meio de sistemas de inferência Fuzzy da análise da concentração dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante e desta forma diagnosticar defeitos elétricos internos em transformadores de Potência. Assim sendo o sistema proposto deve fornecer respostas que auxiliem no diagnóstico de falhas e avarias nos interiores dos transformadores e no processo de tomada de decisões no acompanhamento da evolução destas falhas de forma a aumentar a confiabilidade em relação à utilização dos métodos individualmente. O sistema desenvolvido baseou-se na pesquisa acadêmica de normas e técnicas mais utilizadas na literatura que relacionam o gás dissolvido no óleo mineral isolante com a falha. O sistema proposto foi validado por meio de dados reais de dois transformadores pilotos e vários sistemas Fuzzy foram construídos, cada um especialista em um determinado método. Os resultados encontrados mostraram-se compatíveis com aqueles obtidos pelos métodos convencionais comprovando que a ferramenta pode ser utilizada como suporte para uma análise rápida e confiável do estado do óleo isolante dos transformadores.

Palavras Chave: Transformadores de Potência, Óleo Isolante, Sistema Fuzzy, Análise Cromatográfica, Identificação de Falhas.

ABSTRACT

CARRAPATO, M. A. (2015). *Fuzzy Inference System for Electrical Defect Assessment in Power Transformers Using Chromatographic Analysis*. Dissertation (Master's Degree) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2016.

The objective of this research was to model by analyzing the fuzzy inference systems the concentration of gases dissolved in the insulating oil and diagnosing thereby internal defects in electrical power transformers. Therefore the proposed system should provide answers that help in the diagnosis of faults and malfunctions in the interiors of the transformers and in the decision-making process in monitoring the evolution of these failures in order to increase the reliability regarding the use of the methods individually. The system developed was based on academic research standards and techniques commonly used in the literature relating the gas dissolved in the insulating oil with failure. The proposed system was validated by real data of two pilots transformers and various Fuzzy systems were built, each an expert in a particular method. The results were compatible with those obtained by conventional methods proving that the tool can be used as support for quick and reliable analysis of the insulating oil condition of transformers.

Keywords: Power Transformers, Insulating Oil, Fuzzy System, Chromatographic Analysis, Troubleshooting.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
OMI	Óleo Mineral Isolante
CP	Percentual de Carbonos Parafínicos
CN	Percentual de Carbonos Naftênicos
CA	Percentual de Carbonos Aromáticos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
CTEEP	Cia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
OQUIN	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
<i>DGA</i>	<i>Dissolved Gas Analysis</i>
<i>IEEE</i>	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
<i>IEC</i>	<i>International Eletrotechnical Comission</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Esquema do sistema de isolamento de um transformador de potência.	6
Figura 2. 2 – Instrumento utilizado para o ensaio de cor.....	11
Figura 2. 3 – Método do densímetro.....	122
Figura 2. 4 – Instrumento utilizado para medição do fator de perdas dielétricas.....	13
Figura 2. 5 – Instrumento utilizado para medição da rigidez dielétrica.	14
Figura 2. 6 – Instrumento utilizado para medição do teor de água.....	15
Figura 2. 7 – Instrumento utilizado para medição da tensão interfacial.	16
Figura 2. 8 – Instrumento utilizado para medição do índice de neutralização.	16
Figura 2. 9 – Gráfico para falha incipiente.....	23
Figura 2. 10 – O Triângulo de Duval.....	26
Figura 3. 1 – Funções de pertinência.	31
Figura 3. 2 – Representação da variável linguística corrente.....	34
Figura 3.3 – Mecanismo de inferência <i>fuzzy</i>	36
Figura 3.4 – Diagrama típico de um modelo de Sistemas <i>Fuzzy</i>	36
Figura 4. 1 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Hidrogênio (H ₂).	39
Figura 4. 2 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Oxigênio (O ₂).	39
Figura 4. 3 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Nitrogênio (N ₂).	40
Figura 4. 4 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Metano (CH ₄).	40
Figura 4. 5 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Monóxido de carbono (CO).	41
Figura 4. 6 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Dióxido de carbono (CO ₂).	41

Figura 4. 7 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Etileno (C ₂ H ₄).....	42
Figura 4. 8 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Etano (C ₂ H ₆).....	42
Figura 4. 9 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Acetileno (C ₂ H ₂).....	43
Figura 4. 10 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Total Geral de Gases.	43
Figura 4. 11 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Total Geral Gases combustíveis (Combinado).....	444
Figura 4. 12 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores pilotos – condição 1%.....	45
Figura 4. 13 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores pilotos – condição 2.5%.....	45
Figura 4. 14 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores piloto – condição 5%.....	46
Figura 4. 15 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores piloto – condição 10%.....	46
Figura 4. 16 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores piloto – condição 25%.....	477
Figura 4. 17 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores piloto – condição média.	477
Figura 4. 18 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores piloto – condição delta (%).....	48
Figura 4. 19 – Análise por IEC para os transformadores piloto – relação CH ₄ /H ₂	499
Figura 4. 20 – Análise por IEC para os transformadores piloto – relação C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	49
Figura 4.21 – Análise por IEC para os transformadores piloto – relação C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	50
Figura 4. 22 – Análise por IEC para os transformadores piloto – condição 1%.....	50
Figura 4. 23 – Análise por IEC para os transformadores piloto – condição 2.5%.....	51
Figura 4.24 – Análise por IEC para os transformadores piloto – condição 5%.....	51
Figura 4. 25 – Análise por IEC para os transformadores piloto – condição 10%.....	52
Figura 4. 26 – Análise por IEC para os transformadores piloto – condição 25%.....	52

Figura 4. 27 – Análise por IEC para os transformadores piloto – condição média.	53
Figura 4. 28 – Análise por IEC para os transformadores piloto – condição delta (%).....	53
Figura 4. 29 – Análise por IEEE para os transformadores piloto – Condição 1%.....	54
Figura 4. 30 – Análise por IEEE para os transformadores piloto – Condição 2.5%.....	55
Figura 4. 31 – Análise por IEEE para os transformadores piloto – Condição 5%.....	55
Figura 4. 32 – Análise por IEEE para os transformadores piloto – Condição 10%.....	56
Figura 4. 33 – Análise por IEEE para os transformadores piloto – Condição 25%.....	56
Figura 4.34 – Análise por IEEE para os transformadores piloto – Condição Média.	57
Figura 4. 35 – Análise por IEEE para os transformadores piloto – Condição Delta (%).....	57
Figura 4.36 – Análise por OQUIN para os transformadores piloto – NN.	58
Figura 4. 37 – Análise por OQUIN para os transformadores piloto – Cor.....	59
Figura 4. 38 – Análise por OQUIN para os transformadores piloto – Tensão 25.....	59
Figura 4. 39 – Análise por OQUIN para os transformadores piloto – OQUIN.....	60
Figura 4. 40 – Análise por OQUIN para os transformadores piloto – Condição 1%.	60
Figura 4.41 – Análise por OQUIN para os transformadores piloto – Condição 2.5%.....	61
Figura 4. 42 – Análise por OQUIN para os transformadores piloto – Condição 5%.	61
Figura 4. 43 – Análise por OQUIN para os transformadores piloto – Condição 10%.....	62
Figura 4. 44 – Análise por OQUIN para os transformadores piloto – Condição 25%.....	62
Figura 4. 45 – Análise por OQUIN para os transformadores piloto – Condição Média.	63
Figura 4. 46 – Análise por DORNENBURG para os transformadores piloto – CH4/H2.	64
Figura 4. 47 – Análise por DORNENBURG para os transformadores piloto – C2H2/C2H4.....	64
Figura 4. 48 – Análise por DORNENBURG para os transformadores piloto – C2H6/C2H2.....	65

Figura 4. 49 – Análise por DORNENBURG para os transformadores piloto – C2H2/CH4.....	65
Figura 4. 50 – Análise por DORNENBURG para os transformadores piloto – Condição 1%.....	66
Figura 4. 51 – Análise por DORNENBURG para os transformadores piloto – Condição 2.5%.....	66
Figura 4. 52 – Análise por DORNENBURG para os transformadores piloto – Condição 5%.....	67
Figura 4. 53 – Análise por DORNENBURG para os transformadores piloto – Condição 10%.....	67
Figura 4. 54 – Análise por DORNENBURG para os transformadores piloto – Condição 25%.....	68
Figura 4.55 – Análise por DORNENBURG para os transformadores piloto – Condição Média.	68
Figura 4. 56 – Análise por DORNENBURG para os transformadores piloto – Condição Delta (%).	69
Figura 4. 57 – Análise Global para os transformadores piloto – Duval.....	70
Figura 4. 58 – Análise Global para os transformadores piloto – IEEE.....	70
Figura 4. 59 – Análise Global para os transformadores piloto – Rogers.....	71
Figura 4. 60 – Análise Global para os transformadores piloto – IEC.	71
Figura 4. 61 – Análise Global para os transformadores pilotos.	72
Figura 5.1 – Sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval.....	75
Figura 5.2 – Entrada 1 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – H2.....	75
Figura 5.3 – Entrada 2 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – CH4.....	76
Figura 5.4 – Entrada 3 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – C2H2.....	76
Figura 5.5 – Entrada 4 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – C2H4.....	76
Figura 5.6 – Entrada 5 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – C2H6.....	77
Figura 5.7 – Entrada 6 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – CO.....	77

Figura 5.8 – Entrada 7 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – CO ₂	77
Figura 5.9 – Saída do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – Condição.....	78
Figura 5.10 – Sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE.....	78
Figura 5.11 – Entrada 1 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – H ₂	79
Figura 5.12 – Entrada 2 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – CH ₄	79
Figura 5.13 – Entrada 3 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – C ₂ H ₂	79
Figura 5.14 – Entrada 4 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – C ₂ H ₄	80
Figura 5.15 – Entrada 5 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – C ₂ H ₆	80
Figura 5.16 – Entrada 6 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – CO.....	80
Figura 5.17 – Entrada 7 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – CO ₂	81
Figura 5.18 – Saída do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – Condição.....	81
Figura 5.19 – Sistema Fuzzy para avaliação do Método de Dornenburg	82
Figura 5.20 – Entrada 1 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Dornenburg – CH ₄ /H ₂	82
Figura 5.21 – Entrada 2 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Dornenburg – CH ₄ H ₂ /C ₂ H ₄	82
Figura 5.22 – Entrada 3 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Dornenburg – C ₂ H ₆ /C ₂ H ₂	83
Figura 5.23 – Entrada 4 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Dornenburg – C ₂ H ₂ /CH ₄	83
Figura 5.24 – Saída do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Dornenburg – Condição.....	84
Figura 5.25 – Sistema Fuzzy para avaliação do Método IEC.....	84
Figura 5.26 – Entrada 1 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEC – CH ₄ /R ₂	85
Figura 5.27 – Entrada 2 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEC – C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	85

Figura 5.28 – Entrada 3 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEC – C2H4/C2H6.....	85
Figura 5.29 – Saída do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEC – Condição.	86
Figura 5.30 – Sistema Fuzzy para avaliação do Método OQUIN.	86
Figura 5.31 – Entrada 1 do sistema Fuzzy para avaliação do Método OQUIN – NN.	87
Figura 5.32 – Entrada 2 do sistema Fuzzy para avaliação do Método OQUIN – IFT.....	87
Figura 5.33 – Entrada 3 do sistema Fuzzy para avaliação do Método OQUIN – Cor.	87
Figura 5.34 – Entrada 4 do sistema Fuzzy para avaliação do Método OQUIN.....	88
Figura 5.35 – Saída do sistema Fuzzy para avaliação do Método OQUIN – Condição.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Mecanismo de peroxidação.....	8
Tabela 2.2 – Compostos resultantes das reações de polimerização	9
Tabela 2.3 – Normas a serem aplicadas nos ensaios do óleo isolante	10
Tabela 2.4 – Classificação OMI.....	17
Tabela 2.5 – Gases analisados pela DGA.....	19
Tabela 2.6 – Comparação entre metodologias para o diagnóstico de falhas	21
Tabela 2.7 – Identificação de falhas por meio do Método de Rogers.....	22
Tabela 2.8 – Identificação de falhas através do Método de Dornenburg.....	23
Tabela 2.9 – Perfis típicos de comparação	24
Tabela 2.10 – Relação dos códigos IEC	25
Tabela 2.11 – Classificação da falha conforme relação dos códigos IEC.	25
Tabela 2.12 – Condições de falha do triangulo de Duval.	27

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução	1
1.1 Motivação e Relevância	1
1.2 Objetivos da Dissertação	3
1.3 Contribuições da Dissertação	3
1.4 Organização da Dissertação	4
 Capítulo 2. Aspectos do Óleo Isolante Utilizado em Transformadores de Potência	 6
2.1 Introdução.....	6
2.2 Análises Físico-Químicas do Óleo Isolante	9
2.2.1 Ensaaios de Cor.....	11
2.2.2 Densidade	11
2.2.3 Perdas Dielétricas	12
2.2.4 Rigidez Dielétrica.....	13
2.2.5 Teor de Água.....	14
2.2.6 Tensão Interfacial	15
2.2.7 Índice de Neutralização	16
2.3 Índice de Qualidade do Sistema (OQUIN)	17
2.4 Tratamentos Empregados na Recuperação do OMI em Uso	18
2.5 Análises Cromatográficas do Estado do Óleo Isolante	19
2.6 Diagnósticos de Falhas em Transformadores de Potência	21
2.6.1 Método de Rogers	21
2.6.2 Método de Dornenburg	23
2.6.3 Método do Gás Chave	24
2.6.4 Relação dos Códigos IEC.....	25
2.6.5 Triângulo de Duval.....	25
 Capítulo 3. Aspectos Fundamentais Relacionados às Ferramentas Empregadas no Projeto	 29
3.1 Introdução.....	29
3.2 Sistemas de Inferência Fuzzy	29
3.2.1 Conceitos Sobre Conjuntos e Lógica Fuzzy	31
3.2.2 Definição de Operações e Operadores da Lógica Fuzzy.....	33
3.2.3 Regras Fuzzy	33

3.2.4 Agregação de Regras	35
Capítulo 4. Análise na Base de Dados de Ensaios em Óleo Isolante	38
4.1 Introdução	38
4.2 Análises Cromatográficas do TR1 e TR5	38
4.3 Análises por Meio do Triângulo de Duval	44
4.4 Análises por IEC	48
4.5 Análises por Métodos IEEE	54
4.6 Análises por OQUIN	58
4.7 Análises por Rogers	63
4.8 Avaliação Global	69
Capítulo 5. Ajuste dos Sistemas Fuzzy Empregados Para Avaliação da Condição dos Transformadores.....	74
5.1 Introdução	74
5.2 Sistema Fuzzy para o Método de Duval	74
5.3 Sistema Fuzzy para o Método IEEE	78
5.4 Sistema Fuzzy para o Método de Rogers	81
5.5 Sistema Fuzzy para o Método IEC	84
5.6 Sistema Fuzzy para o Método OQUIN	86
Capítulo 6. Conclusões e Trabalhos Futuros	90
Referências Bibliográficas e Literaturas recomendadas	92

Capítulo 1

Introdução

1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA

O crescente aumento da demanda energética nacional, associada às alterações regulamentares do setor elétrico, fez crescer o interesse e a preocupação com a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica.

O Transformador de potência é um equipamento de fundamental importância para o Sistema Elétrico de Potência, sendo o ativo de maior valor agregado em uma instalação de transmissão e distribuição, e falhas destes ativos podem ocasionar interrupções de fornecimento de energia por períodos prolongados, podendo repercutir no sistema produtivo industrial e na sociedade de forma geral. Devido a esta relevância, as empresas do ramo de energia devem estabelecer uma política de manutenção voltada para a sua confiabilidade e disponibilidade [2].

Em função da natureza construtiva dos transformadores, quando da ocorrência de um fenômeno eletromagnético tal equipamento se encontra sujeito a condições extremas que podem resultar em incidência de pontos quentes e movimentação de suas partes ativas. Somando-se a essa possibilidade, têm-se ainda as sobretensões que são observáveis em muitos fenômenos que ocorrem no setor elétrico. Esses efeitos combinados nas suas diferentes formas desencadeiam um grande número de modos de falhas em transformadores. Quando em operação essas falhas evoluem gradativamente ou intempestivamente, podendo resultar na perda do transformador e indisponibilidade do sistema de transmissão. Além da perda do equipamento, podem ocorrer outros prejuízos de grande gravidade, destacando-se aqueles que atentam para vida humana e outros que decorrem de danos ambientais.

A isolação de um transformador é basicamente constituída pelo óleo mineral isolante OMI e pela isolação sólida celulósica. Além de propiciar isolamento elétrico, o OMI permite a transferência de calor (refrigeração) entre suas partes e componentes. Como isolante elétrico, esse deve substituir o ar entre as partes ativas, preenchendo todos os espaços vazios, e oferecer alta rigidez dielétrica e baixa condutividade elétrica. Atuando como meio de transferência

térmica, o óleo isolante deve conduzir de maneira adequada a energia térmica das partes ativas do transformador ao meio de dissipação, a fim de que a temperatura interna de funcionamento permaneça em níveis nominais de operação.

A avaliação das concentrações dos gases dissolvidos no OMI do transformador destaca-se dentre as metodologias utilizadas para a identificação de falhas em transformadores de potência imersos em OMI.

As abordagens de detecção de falhas em transformadores por meio da análise da concentração dos gases dissolvidos no óleo isolante do equipamento baseiam-se na constatação de que as falhas, tais como as descargas parciais, as descargas de alta energia, os efeitos corona, os sobreaquecimentos, dentre outros, interagem com o óleo isolante do transformador e, a partir desta interação, o óleo sofre alterações na sua composição química e nas suas propriedades físicas. Em geral, estas alterações são acompanhadas do desprendimento de gases que por apresentarem volumes ínfimos acabam por se dissolverem no óleo isolante. Através de ensaios cromatográficos realizados no óleo isolante, obtêm-se então os valores volumétricos dos principais gases que estão dissolvidos no óleo.

Além dos ensaios cromatográficos realizados com o óleo isolante, destacam-se também os ensaios físico-químicos feitos no mesmo. Por meio destes ensaios, diversas características físico-químicas do óleo isolante são levantadas. Dentre as propriedades físico-químicas de maior interesse (dentro do contexto de análise do óleo isolante) destacam-se o exame de cor, da densidade, da rigidez dielétrica, da tensão interfacial, do teor de água, do índice de neutralização e do fator de perdas dielétricas do óleo. Todos os ensaios físico-químicos mencionados podem ser realizados no próprio local de instalação do transformador, sendo que grande parte dos ensaios pode também ser realizado com o equipamento em funcionamento [20].

Diante desta premissa, diversas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de buscar novas metodologias que sejam eficientes na detecção de falhas em transformadores de transmissão, tendo como o principal motivo o alto custo associado tanto à aquisição de um novo transformador como à manutenção do mesmo.

Um sistema ideal de diagnóstico de falhas em transformadores precisa empregar as vantagens de cada método de diagnóstico, explorando-se suas eficiências, ao mesmo tempo em que se busca sanar suas deficiências.

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O desenvolvimento deste projeto de pesquisa possui os seguintes objetivos:

1. Investigar como podem ser aplicadas as metodologias relacionadas à detecção de falhas em transformadores de potência a partir das análises dos gases dissolvidos no óleo (DGA).
2. Integrar utilizando um sistema de inferência fuzzy as informações advindas das análises dos gases dissolvidas no óleo isolante (DGA) dos transformadores obtidos a partir da cromatografia gasosa e permitir identificar e localizar defeitos elétricos internos em transformadores de potência.
3. Utilizar os resultados advindos da modelagem da concentração dos gases dissolvidos no OMI por meio dos vários sistemas Fuzzy e indicar as condições do transformador de potência com relação a defeitos elétricos internos. Os resultados obtidos devem fornecer uma resposta que combine os melhores resultados não somente dos métodos tradicionais já consolidados na literatura técnica, bem como com o uso de sistemas Fuzzy, de forma a aumentar a confiabilidade em relação aos métodos individualmente, e assim fornecer subsídios para uma manutenção adequada do equipamento e incrementar a capacidade de interpretação dos resultados que norteiam as atividades da equipe de manutenção, contribuindo para a minimização dos custos associados com a manutenção dos transformadores de potência, e possibilitando também, um aumento de sua vida útil.

A pesquisa baseou-se na utilização de normas e de métodos de diagnósticos de falhas em transformadores de potência e para direcionar os desenvolvimentos foram elencados dois transformadores pilotos e vários sistemas Fuzzy foram construídos, cada um especialista em um determinado método. Estas análises permitiram o refinamento da lógica. A resposta global de todos estes sistemas representa a condição do transformador.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

A contribuição primordial deste trabalho de pesquisa propõe atribuir maior confiabilidade aos resultados de diagnóstico de falhas em transformadores de potência e fomentar os responsáveis pela manutenção e operação munição para serem assertivos na determinação do momento certo de intervir no equipamento.

Como informação complementar, no decorrer do período de mestrado, os seguintes trabalhos foram publicados em anais de congressos científicos:

FLAUZINO, Rogério Andrade , SILVA, Ivan Nunes , GONZALES, Carlos Guilherme , COSTA, Paulo Izídio , BONFIN, Thiago Samuel , CARRAPATO, Marcelo Aparecido , V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Sistema Fuzzy Robusto a Incertezas para Avaliação Integrada de Ensaaios em Transformadores de Potência (CD-ROM // Paper N°SBSE2014-0222//06 Páginas, 2014, Foz do Iguaçu // Brasil).

SILVA, Ivan Nunes, FLAUZINO, Rogério Andrade, SPATTI, Danilo Hernane, GONZALES, Carlos Guilherme, BONFIN, Thiago Samuel, CARRAPATO, Marcelo Aparecido, COSTA, Paulo Izídio, Anais do V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Sistema Especialista Para Análise Integrada de Ensaaios Experimentais Visando Diagnóstico de Transformadores de Transmissão (CD-ROM // Paper N°SBSE2014-0191//06 Páginas, 2014, Foz do Iguaçu // Brasil).

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A organização dos capítulos deste trabalho de pesquisa está como se segue.

No Capítulo 2 encontra-se registrado os principais conceitos envolvendo aspectos construtivos dos transformadores, aspectos do óleo isolante, métodos de diagnóstico de falhas em transformadores, por meio de análises de gases dissolvidos no óleo isolante.

No terceiro capítulo são apresentados os conceitos sobre a lógica Fuzzy que são as ferramentas empregadas no trabalho de pesquisa.

A análise e o processamento realizado na base de dados de ensaios da CTEEP é o foco do Capítulo 4.

O capítulo 5 descreve os ajustes dos sistemas Fuzzy empregados para a avaliação dos transformadores.

Finalmente, o Capítulo 6 descreve as conclusões referentes ao trabalho desenvolvido, assim como tece algumas proposições sobre a continuidade da pesquisa.

Capítulo 2

Aspectos do Óleo Isolante Utilizado em Transformadores de Potência

2.1 INTRODUÇÃO

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 [21].

Figura 2. 1 – Esquema do sistema de isolamento de um transformador de potência.

Como apontado acima, o sistema isolante é constituído por duas partes sendo elas o isolamento sólido e o isolamento líquido. Segundo [1], a maior parte da isolamento sólida provém do papel, ou seja, da celulose. Os materiais mais utilizados para fabricação desses papéis são:

- Papel Kraft obtido utilizando-se da fibra da madeira;

- ❑ Papel manilha obtido utilizando-se de fibra da madeira e cânhamo;
- ❑ Papelão Kraft também obtido utilizando-se da fibra da madeira;
- ❑ Pressboard, papelão feito com fibra de algodão;
- ❑ Papel termoestabilizado, papel cuja celulose passa por tratamento especial. É empregado quando se deseja resistências a altas temperaturas.

O isolamento líquido do transformador é feito pelo OMI que tem como função propiciar isolamento elétrico e permitir a transferência de calor, refrigeração, ou seja, conduzir a energia térmica das partes ativas do transformador ao meio de dissipação.

Obtido por meio da destilação do petróleo natural, fração de 300 a 400 °C, este fluido é apropriado para o uso em equipamentos elétricos devido às suas propriedades dielétricas e refrigerantes, como a baixa viscosidade. O OMI é constituído basicamente por hidrocarbonetos, em sua maioria, e podem ser classificados em três grupos:

- ❑ Hidrocarbonetos parafínicos: são hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta, linear ou ramificada.
- ❑ Hidrocarbonetos naftênicos: são hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada contendo de um a seis anéis. Estes podem possuir uma ou mais cadeias laterais lineares ou ramificadas.
- ❑ Hidrocarbonetos aromáticos: são hidrocarbonetos que contêm um ou mais anéis aromáticos. Podem ou não apresentar cadeias laterais.

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 por meio de resultados do percentual de carbonos parafínicos (CP), naftênicos (CN) e aromáticos (CA). Essa classificação pode ser obtida empregando técnicas de espectroscopia, na região do infravermelho, pela determinação da quantidade de carbonos parafínicos. Óleos com CP inferiores a 50% são considerados naftênicos, enquanto que aqueles com CP iguais ou superiores a 56% são classificados como parafínicos; para os valores entre 50 e 56% são óleos intermediários.

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 [1].

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.

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 na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Mecanismo de peroxidação.

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

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 [1]. Ilustrativamente é possível conferir tais informações na 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.

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	$ \begin{array}{c} \text{R}-\text{CH}_2-\text{OOH} \end{array} \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 $

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.

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.

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 ensaios físico-químicos e suas respectivas normas.

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
Perdas Dielétricas (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

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.

Dos ensaios apontados na Tabela 2. 3, os que se destacam 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 comparador 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 e caso a cor esteja entre duas cores, o resultado será estimado por uma interpolação.

Não é uma propriedade crítica, mas pode ser útil para avaliação comparativa. Um número de cor que aumenta rapidamente ou muito alto pode ser uma indicação de deterioração ou contaminação do óleo [2].

Figura 2. 2 – Instrumento utilizado para o ensaio de cor.

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

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

A densidade é usada para identificação do tipo de óleo. Em climas frios, a densidade do óleo pode ser importante na determinação da sua adequabilidade ao uso. Por exemplo, cristais de gelo formados a partir da água podem flutuar no óleo de alta densidade e levar a abertura de arco elétrico na fusão posterior [2].

Figura 2. 3 – Processo denominado método do densímetro.

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.

Figura 2. 4 – Instrumento utilizado para medição do fator de perdas dielétricas.

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 desruptivas (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 transformadores utiliza-se o método de calota e os valores limites para óleo em transformadores em uso são de 40 kV (<69 kV), 50 kV (≥ 69 kV ≤ 230 kV) e 60 kV (>230 kV) conforme norma ABNT NBR 10576:2012.

Figura 2. 5 – Instrumento utilizado para medição da rigidez dielétrica.

2.2.5 Teor de Água

Os transformadores são secos durante o processo de fabricação até que as medições ou procedimentos padrão resultem em um teor de umidade de 0,5%, dependendo dos requisitos do comprador ou fabricante. Após a secagem inicial, o teor de umidade cresce continuamente. Há duas causas para o aumento de água na isolação do transformador:

A entrada de umidade proveniente da atmosfera;

Degradação da celulose e óleo [2].

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 [1].

O método consiste na oxidação do dióxido de enxofre (SO₂) pelo iodo em presença de água, da piridina e do álcool metílico. A oxidação do SO₂ 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 35 ppm para equipamentos com classe entre 69 kV e 230kV, e de 25 ppm para equipamentos com classe de tensão de 230 kV ou superior.

Figura 2. 6 – Instrumento utilizado para medição do teor de água.

2.2.6 Tensão Interfacial (IFT)

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. 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 22 dina/cm a 25 °C para transformadores ≤ 230 kV e 25 dina/cm a 25 °C para transformadores >230 kV.

Uma rápida diminuição da tensão interfacial pode também ser uma indicação de problemas de compatibilidade entre o óleo e alguns materiais do transformador (vernizes, gaxetas, etc) ou de contaminação durante o enchimento com óleo [2].

Figura 2. 7 – Instrumento utilizado para medição da tensão interfacial.

2.2.7 Índice de Neutralização (NN)

Pode ser chamado de acidez do óleo e é a medida dos componentes ácidos presentes no óleo [2]. 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 0,15 mgKOH/g.

Figura 2. 8 – Instrumento utilizado para medição do índice de neutralização.

2.3 ÍNDICE DE QUALIDADE DO SISTEMA (OQUIN)

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.

Tabela 2.4 – Classificação OMI.

NN	IFT	Cor	OQIN	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 isolamento 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 isolamento, 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.

Outros ensaios como a estabilidade a oxidação e enxofre corrosivo podem ser realizados apenas em circunstâncias especiais. Para estabelecer identificação do tipo de óleo pode ser utilizado os ensaios de ponto de fulgor, compatibilidade, ponto de fluidez e viscosidade.

Ainda temos o ensaio de teor de PCBs, Bifenilas policloradas que é um ensaio investigativo especial [2].

2.4 TRATAMENTOS EMPREGADOS NA RECUPERAÇÃO DO OMI EM USO

Conforme descrito anteriormente, quando o OMI perde suas propriedades dielétricas há três formas para recuperá-lo – regeneração que é a remoção dos produtos de oxidação e contaminantes polares através de percolação em bauxita ativada, o recondicionamento que é a remoção de água e partículas sólidas utilizando o termovácuo ou a substituição do óleo. 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.

Uma forma de regeneração do óleo isolante é o tratamento termovácuo, 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.

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. Neste processo, o óleo é percolado através de um agente adsorvente (bauxita, atapungita ou terra Füller), 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 recondicionamento por termo-vácuo, para retirada de umidade e de gases. 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.

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 na Tabela 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 na Tabela 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. 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 liberados 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 (ver em anexo o funcionamento detalhado do equipamento).

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 classificá-las. As principais metodologias para o diagnóstico das falhas são:

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

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 identificado. 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). Um resumo do desempenho destes métodos pode ser conferido na Tabela 2.6

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
Dornenburg	26	3	29
IEC	15	8	23
Triângulo de Duval	0	4	4

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 [21].

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 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	≤ 0,1	< 1,0	< 1,0	< 0,5
Descargas parciais corona com tracking	≤ 0,1	< 1,0	< 1,0	≥ 0,5 < 3,0 ou ≥ 3,0
Descarga contínua	> 0,1 < 1,0	< 1,0	≥ 3,0	≥ 3,0
Arco elétrico com grande dissipação de energia	> 0,1 < 1,0	< 1,0	≥ 1,0 < 3,0 ou ≥ 3,0	≥ 0,5 < 3,0 ou ≥ 3,0
Arco elétrico com pequena dissipação de energia	> 0,1 < 1,0	< 1,0	< 1,0	≥ 0,5 < 3,0
Superaquecimento para 150°	≥ 1,0 < 3,0 ou ≥ 3,0	< 1,0	< 1,0	< 0,5
Superaquecimento 150 – 200°C	≥ 1,0 < 3,0 ou ≥ 3,0	≥ 1,0	< 1,0	< 0,5
Superaquecimento 200 – 300°C	> 0,1 < 1,0	≥ 1,0	< 1,0	< 0,5
Aquecimento dos condutores dos enrolamentos	> 0,1 < 1,0	< 1,0	≥ 1,0 < 3,0	< 0,5
Circulação de corrente elétrica no núcleo ou no tanque	≥ 1,0 < 3,0	< 1,0	≥ 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) [5]. Neste método, utiliza-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 resume os valores das razões com o tipo de falha associada. A Figura 2.3 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	C_2H_2 / C_2H_4	C_2H_6 / C_2H_2	C_2H_2 / 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. 9 – 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 isolamento 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.

Tabela 2.9 – Perfis típicos de comparação.

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

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.

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	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
	C_2H_4	H_2	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 dos códigos IEC.

Nº	Tipo de Falha	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
		C_2H_4	H_2	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

Segundo [1] 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 relacionadas 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 mais bem visualizado pela Figura 2. 10 – , onde a evolução dos gases gerados é representada por um triângulo.

Figura 2. 10 – O Triângulo de Duval.

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.

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. 10 – 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: $X = \% \text{ CH}_4 = 100 (A/S)$, $Y = \% \text{ C}_2\text{H}_4 = 100 (B/S)$, $Z = \% \text{ C}_2\text{H}_2 = 100 (C/S)$. 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 a Tabela 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: $T < 300^\circ\text{C}$	Papel mudando coloração para acastanhado quando $T > 200^\circ\text{C}$ e carbonizado quando $T > 300^\circ\text{C}$
T2	Falha térmica em média temperatura: $300 < T < 700^\circ\text{C}$	Carbonização do papel, formando partículas de carbono no óleo
T3	Falha térmica em alta temperatura: $T > 700^\circ\text{C}$	Excessiva formação de formando partículas de carbono no óleo, tornando-o com coloração metálica em $T = 800^\circ\text{C}$ e fundindo-o com $T > 1000^\circ\text{C}$
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

Aspectos Fundamentais Relacionados às Ferramentas Empregadas no Projeto

3.1 INTRODUÇÃO

A aplicação crescente de técnicas de sistemas inteligentes, agregadas às técnicas convencionais, tem gerado resultados bem eficientes e cada vez mais convincentes quando utilizadas em problemas relacionados aos sistemas de transmissão de energia elétrica, pois o objetivo de destaque da aplicação dessas técnicas consiste no alcance de tratabilidade, robustez, baixo custo e altas taxas de eficiência.

Mais especificamente, a utilização de sistemas inteligentes, notadamente aqueles baseados nas redes neurais artificiais e em sistemas e controladores fuzzy, possui elevado potencial de aplicação em sistemas dedicados à transmissão de energia elétrica, pois as características mais atrativas desses sistemas consistem em sua elevada habilidade em mapear sistemas não-lineares e em tratar as eventuais incertezas associadas ao processo.

Portanto, o objetivo deste capítulo é descrever os principais aspectos envolvidos com tais tecnologias, notadamente os pontos relacionados com os sistemas fuzzy. Assim, a finalidade do presente capítulo é moldar alguns conceitos intrínsecos dessas abordagens, fornecendo os conhecimentos necessários para o correto entendimento do Capítulo 5, o qual tratará de expor diversas propostas de ensaios para detecção de falhas em transformadores.

3.2 SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY

O termo fuzzy em inglês tem diversos significados; porém, os conceitos mais utilizados passam por vago, difuso, nebuloso, incerto, etc. Essa seção tem por finalidade apresentar os conceitos fundamentais de Sistemas Fuzzy com destaque na área de engenharia elétrica.

Os Sistemas Fuzzy são técnicas de inteligência computacional usada para representação e processamento do conhecimento. Suas características baseiam na lógica fuzzy proposta por Lofti A. Zadeh em 1965 [10].

Essa lógica é o ramo da matemática 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.

A modelagem e o 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 os dados desta natureza e até mesmo os conflitantes são tratados [11].

A tecnologia advinda da teoria de conjuntos fuzzy e da lógica fuzzy tem permitido a aplicação destas técnicas em diversas áreas do conhecimento, 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 [12,13].

Como mencionado anteriormente, a lógica fuzzy procura expressar o raciocínio aproximado, ou seja, através da representação do conhecimento por regras pode-se responder a um determinado estímulo. Na lógica fuzzy existe a opção adicional de se empregar probabilidades lingüísticas, 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 utilizado 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, conseqüentemente, 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.

3.2.1 CONCEITOS SOBRE CONJUNTOS E LÓGICA FUZZY

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos relacionados aos conjuntos e a 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 de conjuntos clássica, um elemento ou 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 da expressão (3.1) que a função característica, assim definida, pode assumir apenas valores discretos.

Figura 3. 11 – Funções de pertinência.

Frequentemente, uma generalização desta idéia 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, a partir deste, tem-se que o grau de pertinência é um somente em determinado valor, sendo nulo para os demais valores.

Zadeh [14] propôs uma caracterização mais ampla, na medida em que sugere que alguns elementos são mais pertencentes 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 3.11(c), esta abordagem descrita é apresentada na forma de uma função de pertinência triangular com pico em x , sugerindo a idéia de que quanto mais próximo de x , mais o elemento se identifica com o conceito representado por x [14].

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 $[0, 1]$, ou seja:

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

O conjunto suporte de um conjunto fuzzy A é o subconjunto 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 3.1(c), tem-se uma função de pertinência do tipo triangular, no entanto, pode-se utilizar qualquer função $f: \mathfrak{R} \rightarrow [0, 1]$ para a representação de um determinado conjunto fuzzy.

3.2.2 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), (3.4) e (3.5).

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

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

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

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 (4.6) e como exemplo da t-norma tem-se a expressão (4.7).

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

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

O emprego do operador “max” representando a s-norma e o emprego do operador “min” representando a t-norma foi proposto inicialmente por Zadeh [9]. No entanto, inúmeras outras s-norma e t-norma podem ser empregadas na definição dos sistemas fuzzy [15].

3.2.3 REGRAS 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 “Corrente Elétrica” poderá assumir como valor um dos termos do conjunto {“muito baixa”, “baixa”, “média”, “alta”, “muito 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 “Corrente Elétrica”. A Figura 3. 12 ilustra cinco possíveis termos linguísticos para a variável linguística representando a corrente elétrica.

Figura 3. 12 – Representação da variável linguística corrente.

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:

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

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 [5], 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:

$$\mu_{B'}(v) = \max_u \{ \min(\mu_{A'}(u), \mu_R(u, v)) \}; \quad u \in U, \quad v \in V \quad (3.9)$$

A ação de controle ou de estimação consistirá 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 [15].

3.2.4 AGREGAÇÃO DE REGRAS

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:

$$B' = \bigvee_i^n B'_i \quad (3.10)$$

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

Figura 3. 13 – Mecanismo de inferência *fuzzy*.

A Figura 3. 13 ilustra o processo de inferência max–min quando existem duas regras, $A_i \rightarrow B_i$ e $A_j \rightarrow B_j$, onde A' é o fato de entrada, representado como um conjunto fuzzy.

Todo processo envolvido em um sistema fuzzy é mostrado resumidamente pela Figura 3.14. Os valores numéricos provenientes da medição passam pelo processo de fuzzificação, passando então a serem representadas por valores linguísticos. A base de conhecimento do Sistema Fuzzy encontra-se armazenado nas Regras Fuzzy do tipo “Se-Então”. O processo de inferência aplicado aos valores linguísticos então resulta em uma região de saída, também em valores linguísticos. Para que estes possam realmente ser utilizados é necessário o processo de defuzzificação, encontra um valor numérico para a região de saída Fuzzy, representada em termos linguísticos.

Figura 3.14 – Diagrama típico de um modelo de Sistemas *Fuzzy*.

Capítulo 4

Análise na Base de Dados de Ensaios em Óleo Isolante

4.1 INTRODUÇÃO

A CTEEP – Cia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista possui um grande volume de informações técnicas referentes a ensaios em transformadores de transmissão. Contudo, para a confecção e refinamento do sistema especialista que irá suportar a decisão dos operadores quanto à manutenção é preciso direcionar os desenvolvimentos para os dois transformadores pilotos escolhidos para ensaios:

- ❑ TR1 Bauru (Fabricante: ABB, Modelo: TNba, Ano: 1969, Relação: 440/138/13,8 kV, Potência: 50 MVA, N° Série: 4909.
- ❑ TR5 Bauru (Fabricante: GE, Modelo: CTRIYYDB, Ano: 1976, Relação: 440/138/13,8 kV, Potência: 50 MVA, N° Série: 50.100.573.

A base de dados formadas pelos ensaios envolvendo o óleo isolante destes transformadores constitui-se em dois arquivos do excel, contendo sete planilhas cada arquivo.

As planilhas identificam ensaios físico-químicos e também cromatográficos, realizados ao longo dos anos nos dois transformadores. Neste capítulo serão apresentadas as principais análises realizadas nesta base de dados e que contribuiu de forma imprescindível para a confecção dos sistemas fuzzy.

O motivo da escolha destes transformadores foi a disponibilidade de dados reais e grande histórico.

4.2 ANÁLISES CROMATOGRÁFICAS DO TR1 E TR5

Nas figuras a seguir será possível comparar a evolução dos gases monitorados por meio dos processos de cromatografia gasosa. Cabe salientar que para o TR1 os dados encontram-se desde 1983, já para o TR5, 2003.

Figura 4. 15 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Hidrogênio (H2).

Figura 4. 2 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Oxigênio (O2).

Figura 4. 3– Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Nitrogênio (N2).

Figura 4. 4 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Metano (CH4).

Figura 4. 5 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Monóxido de carbono (CO).

Figura 4. 6 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Dióxido de carbono (CO2).

Figura 4. 7 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Etileno (C₂H₄).

Figura 4.8 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Etano (C₂H₆).

Figura 4. 9– Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Acetileno (C2H2).

Figura 4. 10 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Total Geral de Gases.

Figura 4. 11 – Análise cromatográfica para os transformadores pilotos – Total Geral Gases combustíveis (Combinado).

4.3 ANÁLISES POR MEIO DO TRIÂNGULO DE DUVAL

Para as análises envolvendo o método de determinação de falhas por Triângulo de Duval, foram confeccionados gráficos que mostram a evolução de cada gás ao longo do tempo, para os dois transformadores. Complementarmente, foram apresentadas as informações referentes à condição produzida por este método.

Figura 4. 12 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores pilotos – condição 1%.

Figura 4. 13 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores pilotos – condição 2.5%.

Figura 4 .14 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores piloto – condição 5%.

Figura 4. 15 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores pilotos – condição 10%.

Figura 4. 16 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores piloto – condição 25%.

Figura 4. 17 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores pilotos – condição média.

Figura 4. 18 – Análise por Triângulo de Duval para os transformadores pilotos – condição delta (%).

4.4 ANÁLISES POR IEC

Para as análises envolvendo o método IEC, foram confeccionados gráficos que mostram a evolução de cada gás ao longo do tempo, para os dois transformadores. Complementarmente, foram apresentadas as informações referentes à condição produzida por este método.

Figura 4. 19 – Análise por IEC para os transformadores pilotos – relação CH4/H2.

Figura 4. 20 – Análise por IEC para os transformadores pilotos – relação C2H2/C2H4.

Figura 4.21 – Análise por IEC para os transformadores pilotos – relação C2H4/C2H6.

Figura 4. 22 – Análise por IEC para os transformadores pilotos – condição 1%.

Figura 4. 23 – Análise por IEC para os transformadores pilotos – condição 2.5%.

Figura 4.24 – Análise por IEC para os transformadores pilotos – condição 5%.

Figura 4. 25– Análise por IEC para os transformadores pilotos – condição 10%.

Figura 4. 26 – Análise por IEC para os transformadores pilotos – condição 25%.

Figura 4. 27– Análise por IEC para os transformadores pilotos – condição média.

Figura 4. 28 – Análise por IEC para os transformadores pilotos – condição delta (%).

4.5 ANÁLISES POR MÉTODOS IEEE

Para as análises envolvendo o método IEEE (Rogers, Dornenburg e o gás chave), foram confeccionados gráficos que mostram a evolução de cada gás ao longo do tempo, para os dois transformadores. Complementarmente, foram apresentadas as informações referentes à condição produzida por este método.

Figura 4. 29– Análise por IEEE para os transformadores pilotos – Condição 1%.

Figura 4. 30– Análise por IEEE para os transformadores pilotos – Condição 2.5%.

Figura 4. 31– Análise por IEEE para os transformadores pilotos – Condição 5%.

Figura 4. 32 – Análise por IEEE para os transformadores pilotos – Condição 10%.

Figura 4. 33 – Análise por IEEE para os transformadores pilotos – Condição 25%.

Figura 4.34 – Análise por IEEE para os transformadores pilotos – Condição Média.

Figura 4. 35 – Análise por IEEE para os transformadores pilotos – Condição Delta (%).

4.6 ANÁLISES POR OQUIN (ÍNDICE DA QUALIDADE DO SISTEMA)

Para as análises envolvendo o método OQUIN, foram confeccionados gráficos que mostram a evolução do número de neutralização (NN), da cor, da tensão interfacial a 25 ° C e para o índice de qualidade do sistema (OQUIN) ao longo do tempo, para os dois transformadores. Complementarmente, foram apresentadas as informações referentes à condição produzida por este método.

Figura 4.36 – Análise por OQUIN para os transformadores pilotos – NN.

Figura 4. 37– Análise por OQUIN para os transformadores pilotos – Cor.

Figura 4. 38– Análise por OQUIN para os transformadores pilotos – Tensão 25.

Figura 4. 39– Análise por OQUIN para os transformadores pilotos – OQUIN.

Figura 4. 40– Análise por OQUIN para os transformadores pilotos – Condição 1%.

Figura 4. 41– Análise por OQUIN para os transformadores pilotos – Condição 2.5%.

Figura 4. 42– Análise por OQUIN para os transformadores pilotos – Condição 5%.

Figura 4. 43 – Análise por OQUIN para os transformadores pilotos – Condição 10%.

Figura 4. 44– Análise por OQUIN para os transformadores pilotos – Condição 25%.

Figura 4. 45– Análise por OQUIN para os transformadores pilotos – Condição Média.

4.7 DORNENBURG

Para as análises envolvendo o método de Dornenburg, foram confeccionados gráficos que mostram a evolução de cada gás ao longo do tempo, para os dois transformadores. Complementarmente, foram apresentadas as informações referentes à condição produzida por este método.

O método utiliza a relação dos gases C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_2/CH_4 , C_2H_6/C_2H_2 .

Figura 4. 46– Análise por Dornenburg para os transformadores pilotos – CH4/H2.

Figura 4. 47 – Análise por Dornenburg para os transformadores pilotos – C2H2/C2H4.

Figura 4. 48– Análise por Dornenburg para os transformadores pilotos – C2H6/C2H2.

Figura 4. 49– Análise por Dornenburg para os transformadores pilotos – C2H2/CH4.

Figura 4. 50– Análise por Dornenburg para os transformadores pilotos – Condição 1%.

Figura 4. 51– Análise por Dornenburg para os transformadores pilotos – Condição 2.5%.

Figura 4. 52– Análise por Dornenburg para os transformadores pilotos – Condição 5%.

Figura 4. 53– Análise por Dornenburg para os transformadores pilotos – Condição 10%.

Figura 4. 54– Análise por Dornenburg para os transformadores pilotos – Condição 25%.

Figura 4.55 – Análise por Dornenburg para os transformadores piloto – Condição Média.

Figura 4. 56– Análise por Dornenburg para os transformadores pilotos – Condição Delta (%).

4.8 AVALIAÇÃO GLOBAL

A avaliação global dos ensaios envolvendo a análise de gases nos transformadores pilotos TR1 e TR5 utiliza os métodos Duval, IEEE, Rogers e IEC.

Figura 4. 57 – Análise Global para os transformadores pilotos – Duval.

Figura 4. 58– Análise Global para os transformadores pilotos – IEEE.

Figura 4. 59 – Análise Global para os transformadores pilotos – Rogers.

Figura 4. 60 – Análise Global para os transformadores pilotos – IEC.

Figura 4. 61– Análise Global para os transformadores pilotos.

Capítulo 5

Ajuste dos Sistemas Fuzzy Empregados Para Avaliação da Condição dos Transformadores

5.1 INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores foram apresentadas inúmeras análises nas bases de dados de ensaios envolvendo o óleo isolante dos transformadores pilotos. Tais análises permitiram o ajuste e refinamento da Lógica fuzzy empregada para estimar a condição dos transformadores.

De fato, vários sistemas fuzzy foram construídos, cada um especialista em um determinado método. A resposta global concatenada de todos estes sistemas representa a condição do transformador.

A seguir serão apresentadas as estruturas fuzzy desenvolvidas para desempenhar tal papel.

5.2 SISTEMAS FUZZY PARA O MÉTODO DE DUVAL

Da Figura 5. é possível observar que o sistema fuzzy desenvolvido para representar o método de Duval é formado por 7 entradas e 1 saída. As entradas representam as concentrações de gases que são obtidas por meio de ensaios. Trata-se de um sistema do tipo Mamdani, com duas regras linguísticas. A partir da figura 5.2 é possível se contemplar as características de cada entrada para este sistema. O universo de discurso, bem como os cruzamentos das funções de pertinência, é ajustado de acordo com os dados analisados no Capítulo 4. Finalmente, na Figura 5. tem-se a saída do sistema. Tais análises são estendidas para os demais sistemas fuzzy.

System fisMatDuvaldent25: 7 inputs, 1 outputs, 2 rules

Figura 5. 1– Sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval.

Figura 5. 2 – Entrada 1 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – H2.

Figura 5. 3 – Entrada 2 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – CH4.

Figura 5. 4– Entrada 3 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – C2H2.

Figura 5. 5 – Entrada 4 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – C2H4.

Figura 5. 6 – Entrada 5 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – C2H6.

Figura 5. 7 – Entrada 6 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – CO.

Figura 5. 8– Entrada 7 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – CO2.

Figura 5. 9 – Saída do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Duval – Condição.

5.3 SISTEMAS FUZZY PARA O MÉTODO IEEE

Da Figura 5. é possível observar que o sistema fuzzy desenvolvido para representar o método IEEE é formado por 8 entradas e 1 saída. As entradas representam as concentrações de gases que são obtidas por meio de ensaios. Trata-se de um sistema do tipo Mamdani, com quatro regras linguísticas. A partir da figura 5.11 é possível se contemplar as características de cada entrada para este sistema. O universo de discurso, bem como os cruzamentos das funções de pertinência, é ajustado de acordo com os dados analisados no Capítulo 4. Finalmente, na Figura 5. tem-se a saída do sistema.

Figura 5. 10 – Sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE.

Figura 5. 11 – Entrada 1 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – H2.

Figura 5. 12 – Entrada 2 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – CH4.

Figura 5. 13 – Entrada 3 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – C2H2.

Figura 5. 14 – Entrada 4 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – C2H4.

Figura 5. 15 – Entrada 5 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – C2H6.

Figura 5. 16 – Entrada 6 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – CO.

Figura 5. 17 – Entrada 7 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – CO2.

Figura 5. 18– Saída do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEEE – Condição.

5.4 SISTEMAS FUZZY PARA O MÉTODO DE DORNENBURG

Da figura 5.19 é possível observar que o sistema fuzzy desenvolvido para representar o método de Dornenburg é formado por 4 entradas e 1 saída. As entradas representam as concentrações de gases que são obtidas por meio de ensaios. Trata-se de um sistema do tipo Mamdani, com três regras linguísticas. A partir da figura 5.20 é possível se contemplar as características de cada entrada para este sistema. O universo de discurso, bem como os cruzamentos das funções de pertinência, é ajustado de acordo com os dados analisados no Capítulo 4. Finalmente, na Figura 5. tem-se a saída do sistema.

System fisMatRogerIdent25: 4 inputs, 1 outputs, 3 rules

Figura 5. 19 – Sistema Fuzzy para avaliação do Método de Dornenburg.

Figura 5. 20 – Entrada 1 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Dornenburg – CH4/H2.

Figura 5. 21– Entrada 2 do sistema Fuzzy avaliação do Método de Dornenburg – CH4H2/C2H4.

Figura 5. 22 – Entrada 3 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Dornenburg – C2H6/C2H2.

Figura 5. 23 – Entrada 4 do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Dornenburg – C2H2/CH4.

Figura 5.24 – Saída do sistema Fuzzy para avaliação do Método de Dornenburg – Condição.

5.5 SISTEMA FUZZY PARA O MÉTODO IEC

Da Figura 5. é possível observar que o sistema fuzzy desenvolvido para representar o método IEEE é formado por 3 entradas e 1 saída. As entradas representam as concentrações de gases que são obtidas por meio de ensaios. Trata-se de um sistema do tipo Mamdani, com três regras linguísticas. A partir da figura 5.26 é possível se contemplar as características de cada entrada para este sistema. O universo de discurso, bem como os cruzamentos das funções de pertinência, é ajustado de acordo com os dados analisados no Capítulo 4. Finalmente, na Figura 5. 29 tem-se a saída do sistema.

System fisMatIECIdent25: 3 inputs, 1 outputs, 3 rules

Figura 5. 25 – Sistema Fuzzy para avaliação do Método IEC.

Figura 5. 26 – Entrada 1 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEC – CH4/R2.

Figura 5. 27 – Entrada 2 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEC – C2H2/C2H4.

Figura 5. 28 – Entrada 3 do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEC – C2H4/C2H6.

Figura 5. 29 – Saída do sistema Fuzzy para avaliação do Método IEC – Condição.

5.6 SISTEMAS FUZZY PARA O MÉTODO OQUIN

Da Figura 5. é possível observar que o sistema fuzzy desenvolvido para representar índice de qualidade do sistema é formado por 4 entradas e 1 saída. As entradas representam as concentrações de gases que são obtidas por meio de ensaios. Trata-se de um sistema do tipo Mamdani, com três regras linguísticas. A partir da figura 5.31 é possível se contemplar as características de cada entrada para este sistema. O universo de discurso, bem como os cruzamentos das funções de pertinência, é ajustado de acordo com os dados analisados no Capítulo 4. Finalmente, na Figura 5. tem-se a saída do sistema.

System fisMatOQUIN25: 4 inputs, 1 outputs, 6 rules

Figura 5. 30 – Sistema Fuzzy para avaliação do Método OQUIN.

Figura 5. 31 – Entrada 1 do sistema Fuzzy para avaliação do Método OQUIN – NN.

Figura 5. 32 – Entrada 2 do sistema Fuzzy para avaliação do Método OQUIN – IFT.

Figura 5. 33 – Entrada 3 do sistema Fuzzy para avaliação do Método OQUIN – Cor.

Figura 5. 34 – Entrada 4 do sistema Fuzzy para avaliação do Método OQUIN.

Figura 5. 35 – Saída dos sistemas Fuzzy para avaliação do Método OQUIN – Condição.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Ao longo das últimas duas décadas, as empresas do ramo de energia elétrica passaram a conviver em uma nova realidade de mercado com a implementação de diversas mudanças, como por exemplo, na forma de comercialização de energia, a criação de novos agentes (reguladores e operador) integrantes do sistema, além de um cenário que inclui a possibilidade de fiscalizações nas suas atividades de operação e manutenção com o intuito de verificar a aderência aos contratos de prestação de serviços firmados entre os agentes. Estas mudanças refletiram diretamente na definição das práticas de engenharia de manutenção destas empresas visando um aumento na disponibilidade dos ativos e na qualidade dos serviços prestados[2].

Sendo assim, a identificação de falhas é fator preponderante para manter a confiabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN) e paralelamente o sucesso da organização.

O desenvolvimento desta pesquisa contribuiu para apoiar os mantenedores da organização na detecção de falhas incipientes em transformadores por meio de técnicas de inferência fuzzy.

Os trabalhos de pesquisa foram norteados com o intuito de investigar as principais técnicas envolvendo o processo de detecção de falhas em transformadores, especialmente aquelas fundamentadas em sistemas fuzzy, pois apresentam um elevado potencial de aplicabilidade prática, sendo um reflexo de sua eficiência em mapear problemas complexos.

Este trabalho de pesquisa contemplou o processamento de bases de dados de ensaios em óleo isolante, bem como a confecção e refinamento de sistemas inteligentes para estimar a condição dos transformadores pilotos. Por meio do processamento realizado nos Capítulos 4 e 5, bem como os conceitos apontados nos Capítulos 2 e 3, fora possível o ajuste de sistemas fuzzy capazes de estimar a condição dos transformadores pilotos, TR1 e TR5 (Bauru).

De fato, o problema é complexo e apresenta inúmeros desafios, principalmente quanto à generalidade da ferramenta a ser desenvolvida, frente às mais variadas situações de falhas que podem ser monitoradas por meio de um sistema que realize o diagnóstico do transformador de potência.

Além disso, é importante destacar que cada sistema fuzzy desenvolvido torna-se especialista em aproximar um método, sendo a resposta da condição global estimada após cada submódulo a produzir sua respectiva resposta.

Para trabalhos futuros derivados deste trabalho pode-se destacar:

Desenvolvimento de um sistema maior que envolva diversos ensaios e cujas respostas serão produzidas a partir da análise integrada de resultados advindos de módulos inteligentes incumbidos de apoiar os diversos ensaios a serem realizados no equipamento, ao invés de tratar seus respectivos resultados de maneira individual (como acontece na maioria das metodologias disponíveis). Assim, será possível estimar, inclusive, qual o momento de se proceder com a manutenção preventiva no equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E LITERATURAS RECOMENDADAS

- [1] MILASCH, M., “Manutenção de transformadores em líquido isolante”. E. Blucher, 1984.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10576: Óleo mineral Isolante de Equipamentos elétricos – Diretrizes para Supervisão e Manutenção. Rio de Janeiro, 2012.
- [3] ANSI/IEEE, IEEE guide for interpretation of gases generate in oil-immersed transformers, C57.104-2008.2008.
- [4] ANSI/IEEE, IEEE guide for protection of network transformers, C37.108-1989.1989.
- [5] 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.
- [6] CIGRÉ. CIGRÉ BRASIL, “Guia de Manutenção para transformadores de potência e Reatores Shunt“. GT A2.05. 2013.
- [7] DUVAL, M., “A Review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers”. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 18, p. 8-17, 2002.
- [8] DUVAL, M.; 2003. New Techniques for Dissolved Gas-in-Oil Analysis. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, nº 2, p. 6-15.
- [9] CAMPI, L. R. Modelagem fuzzy da concentração dos gases dissolvidos em óleo mineral isolante de transformadores baseada em resultados de ensaios físico-químicos. XX. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de são Paulo, São Carlos, 2013.
- [10] ZADEH, L.A., “Fuzzy sets”. *Information and Control*, vol. 8, pp. 29-44, 1965.
- [11] LEE, C.C., “Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controllers – Part I and II”. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 20, pp. 404-435, 1990.
- [12] GOMIDE, F.A.C.; GUDWIN, R.R., “Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy”. *Revista Controle e Automação*, vol. 4, no. 3, pp. 97-115, 1994.
- [13] HIROTA, K., “Industrial Applications of Fuzzy Technology”, *Springer Verlag*, 1993.
- [14] ZADEH, L.A., “Outline of new approach to the analysis of complex systems and decision”. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, pp. 28-44, 1973
- [15] PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F., “An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design”. *Massachusetts Institute of Technology*, 1998.

- [16] YANG, Z., TANG, W. H., SHINTEMIROV, A., WU, Q. H., “Association Rule Mining-Based Dissolved Gas Analysis for Fault Diagnosis of Power Transformers,” *IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, vol. 39, pp. 597-610, November 2009.
- [17] NÉMETH, B., LABONCZ, S., KISS, I., “Condition Monitoring of Power Transformers using DGA and Fuzzy Logic,” *IEEE Electrical Insulation Conference*, 2009.
- [18] BRESCIA, T., BRUNO, S., LA SCALA, M., LAMONACA, S., ROTONDO, G., STECCHI, U., “A Fuzzy-Logic Approach to Preventive Maintenance of Critical Power Transformers”. *20th International Conference on Electricity Distribution*, Paper No. 0944, 2009.
- [19] SANTOS, L. T. B., VELLASCO, M. M. B. R., TANSCHKEIT, R., “Decision Support System for Diagnosis of Power Transformers”. *15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, 6pp., 2009.
- [20] COSTA, P. I., “Sistema inteligente para localização de descargas parciais em transformadores de potência,” Tese (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.
- [21] CAMPI, R. L., “Modelagem fuzzy da concentração dos gases dissolvidos em óleo mineral isolante de transformadores baseada em resultados de ensaios físico-químicos,” Tese (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.