



ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

DIOGO PEREIRA VELOSO

**Metodologia *Fuzzy* aplicada ao triângulo de Duval para
diagnóstico de transformadores de potência por meio
de análise de gases dissolvidos**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Goiânia

17 de fevereiro de 2017

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

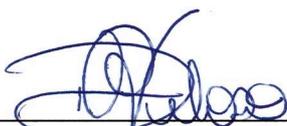
Nome completo do autor: Diogo Pereira Veloso

Título do trabalho: Metodologia *Fuzzy* aplicada ao triângulo de Duval para o diagnóstico de transformadores de potência por meio de análise de gases dissolvidos

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Assinatura do (a) autor (a) ²

Data: 03 / 04 / 2017

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

²A assinatura deve ser escaneada.

DIOGO PEREIRA VELOSO

Metodologia *Fuzzy* aplicada ao triângulo de Duval para diagnóstico de transformadores de potência por meio de análise de gases dissolvidos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Orientador: Leonardo da Cunha Brito

Goiânia

17 de fevereiro de 2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Pereira Veloso, Diogo

Metodologia Fuzzy aplicada ao triângulo de Duval para diagnóstico
de transformadores de potência por meio de análise de gases
dissolvidos [manuscrito] / Diogo Pereira Veloso. - 2017.

LXXV, 75 f.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Elétrica (EEEEC), Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2017.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Lógica Fuzzy. 2. Transformador de Potência. 3. Análise de
Gases. 4. Triângulo de Duval. I. da Cunha Brito, Leonardo, orient. II.
Título.

CDU 621.3



Ata de Defesa de Dissertação de Mestrado

Ata da sessão de julgamento da Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração Engenharia de Computação, do candidato **DIOGO PEREIRA VELOSO** realizada em 17 de fevereiro de 2017.

Aos dezessete dias do mês de fevereiro de dois mil e dezessete, às 14:00 horas, na sala 08 nas dependências da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), reuniram-se os seguintes membros da Comissão Examinadora designada pela Coordenadoria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação: os Doutores Leonardo da Cunha Brito – Orientador (EMC/UFG), Adson da Silva Rocha – IF Goiano e Cacilda de Jesus Ribeiro – EMC/UFG, para julgar a Dissertação de Mestrado de **DIOGO PEREIRA VELOSO**, intitulada “**Metodologia Fuzzy Aplicada ao Triângulo de Duval para o Diagnóstico de Transformadores de Potência por Meio de Análise de Gases Dissolvidos**”, apresentada pelo candidato como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre, em conformidade com a regulamentação em vigor. O Professor Doutor Leonardo da Cunha Brito, Presidente da Comissão, abriu a sessão e apresentou o candidato que discorreu sobre seu trabalho, após o que, foi arguido pelos membros da Comissão na seguinte ordem: **Adson da Silva Rocha** e **Cacilda de Jesus Ribeiro**. A parte pública da sessão foi então encerrada e a Comissão Examinadora reuniu-se em sessão reservada para deliberar. A Comissão julgou então que o candidato, tendo demonstrado conhecimento suficiente, capacidade de sistematização e argumentação sobre o tema de sua Dissertação, foi considerado **aprovado** e deve satisfazer as exigências listadas na Folha de Modificação, em anexo a esta Ata, no prazo máximo de 60 dias, ficando o professor orientador responsável por atestar o cumprimento dessas exigências. Os membros da Comissão Examinadora descreveram as justificativas para tal avaliação em suas respectivas Folhas de Avaliação, anexas a esta Ata. Nada mais havendo a tratar, o presidente da Comissão declarou encerrada a sessão. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-graduação desta Universidade, a presente Ata foi lavrada, lida e, julgada conforme, segue assinada pelos membros da Comissão supracitados e pelo candidato. Goiânia, 17 de fevereiro de 2017.

Comissão Examinadora designada:

Leonardo da Cunha Brito
Leonardo da Cunha Brito – Orientador (EMC/UFG) (Avaliação: APROVADO)

Adson da Silva Rocha
Adson da Silva Rocha – IF Goiano (Avaliação: APROVADO)

Cacilda de Jesus Ribeiro
Cacilda de Jesus Ribeiro – EMC/UFG (Avaliação: APROVADO)

Leonardo R. A. X. de Menezes –UnB (Avaliação: _____)

Gélson da Cruz Júnior (Avaliação: _____)

Candidato

Diogo Pereira Veloso

DIOGO PEREIRA VELOSO

A todas as pessoas que acreditaram que era possível. Á minha mãe que sempre me incentivou e a minha avó que sem ela, não estaria onde estou hoje. A minha esposa pela paciência que teve na reta final. Aos amigos que nunca me deixaram desistir. A eles dedico este nosso trabalho.

Agradecimentos

Se você está lendo esta página é porque eu consegui. E não foi fácil chegar até aqui. Do processo seletivo, que foram dois, passando pela aprovação até a conclusão do Mestrado, foi um longo caminho percorrido.

“Nada foi fácil, nem tampouco tranquilo. A sola do pé conhece toda a sujeira da estrada (provérbio africano).”

Quero agradecer a todos aqueles que sempre confiaram em mim, desde sempre. À minha família e aos meus verdadeiros amigos, sempre. Sempre mesmo. Em especial ao Prof.^o Dr.^o Leonardo da Cunha Brito, meu orientador e exemplo profissional, por ter acreditado que eu seria capaz e ter dado uma segunda chance após um primeiro fracasso.

Aos meus pais, por me terem dado educação, valores e por me terem ensinado a andar. A meu pai (in memoriam), que onde quer que esteja, nunca deixou de me amar, nem de confiar em mim. Pai, meu amor eterno. À minha mãe, amor incondicional. Mãe, você que me gerou e me alfabetizou, ensinando-me a ler, viu como aprendi direitinho? A vocês que, muitas vezes, renunciaram aos seus sonhos para que eu pudesse realizar o meu, partilho a alegria deste momento.

A minha esposa, pela paciência ao me ver sentado à frente de uma tela de computador horas e horas a fio, e nem sempre sair com cara de muitos amigos, pois só tinha escrito um único parágrafo, e mesmo assim olhar com o sorriso lindo que lhe é peculiar e ter a paciência de simplesmente ser um ombro amigo.

Com todos vocês, divido esta alegria e esta conquista.

“Quando não souberes para onde ir, olha para trás e sabe pelo menos de onde vens (Provérbio africano).”

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”

Albert Einstein

Resumo

Transformadores de potência são equipamentos essenciais em um sistema elétrico. São considerados equipamentos de alto custo que requerem uma maior atenção no que tange a ocorrência de falhas. Uma falha em um equipamento pode causar sérios prejuízos à concessionária responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia. No cenário atual, onde a legislação vem sempre aumentando o rigor com que fiscaliza essas falhas e cobrando uma maior eficiência das mesmas, faz-se necessário criar políticas adequadas para investigar possíveis falhas nos equipamentos. Falhas essas que podem ser originadas por diversos fatores, dentre eles, pelos gases dissolvidos no óleo devido a sua degeneração. Um dos métodos mais utilizados para diagnóstico de transformadores de potência é a análise de gases dissolvidos utilizando o Triângulo de Duval, que apresenta uma precisão e confiabilidade consideravelmente altas. No entanto, para um planejamento adequado de manutenção, evitando uma possível retirada brusca do equipamento e corte no fornecimento, é necessário prover mais informações, incluindo uma análise quantitativa das causas das falhas e um histórico da evolução do estado operativo do equipamento. Para tanto propõe-se a utilização de uma lógica *fuzzy* junto ao método de Duval para fornecer uma análise das transições entre os diagnósticos apresentados originalmente de forma a permitir acompanhar a evolução do nível de pertinência de cada possível causa no diagnóstico do equipamento, possibilitando realizar manutenções programadas e preventivas. A metodologia proposta foi validada utilizando dados reais de equipamentos em operação no sistema elétrico brasileiro.

Abstract

Power transformers are essential equipment in electric systems. Considered as highly expensive equipment it requires greater attention regarding the occurrence of failures. A failure on equipment can cause serious trouble to the concessionaire responsible for the generation, transmission and distribution of energy. In the present scenario, where legislation has increased the severity with which oversees these failures and demanding a higher efficiency of the same, it is necessary to create appropriate policies to investigate possible equipment failure. These failures can be caused by several factors, among them, the gases dissolved in the oil due to its degeneration. One of the most used techniques for the diagnosis of power transformers from these dissolved gases is the Duval Triangle, a method that has a precision and considerably high reliability. However, for proper planning of maintenance, avoiding a possible sudden withdrawal and supply cut, it is necessary to provide further information, including a quantitative analysis of the causes of failure and a history of the evolution of the operating status of the machine. To this end it is proposed to use a *fuzzy* logic by the method of Duval to provide an analysis of the transitions between the diagnostic originally presented to enable monitor the level of relevance of each possible cause for the diagnosis equipment allowing perform scheduled and preventive maintenance. The proposed methodology was validated using real data equipment in operation in the Brazilian electric system.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Transformadores de potência monofásicos e trifásico - Transformador monofásico (à esquerda) e trifásico (à direita) (12).	20
Figura 2 – Configuração construtiva de um transformador de potência	21
Figura 3 – Composição química da celulose (16).	25
Figura 4 – Exemplos de Funções de Pertinência	42
Figura 5 – Sistema <i>Fuzzy</i>	46
Figura 6 – Exemplo de aplicação do Triângulo de Duval no diagnóstico de falhas em transformadores de potência - Adaptado de (34)	52
Figura 7 – Interface para Utilização da Biblioteca de Diagnóstico de Falhas	53
Figura 8 – Exemplo de Ensaio de Transformadores	54
Figura 9 – Funções de Pertinência para o gás CH ₄	55
Figura 10 – Funções de Pertinência para o gás C ₂ H ₄	56
Figura 11 – Funções de Pertinência para o gás C ₂ H ₂	57
Figura 12 – Funções de Pertinência para a variável de saída Diagnóstico	57
Figura 13 – Exemplo de aplicação da metodologia proposta através do software <i>QTFuzzy Lite</i> (46)	59
Figura 14 – Representação gráfica dos diagnósticos do equipamento TR01 no Triângulo de Duval	64
Figura 15 – Diagnósticos apresentados pelo método <i>Fuzzy-Duval</i> aplicados em dados históricos de amostragem cromatográfica do transformador TR01	65
Figura 16 – Representação gráfica dos diagnósticos do equipamento TR02 no Triângulo de Duval	68
Figura 17 – Diagnósticos apresentados pelo método <i>Fuzzy-Duval</i> aplicados em dados históricos de amostragem cromatográfica do transformador TR02	69

Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades Químicas do Óleo Isolante(16).	27
Tabela 2 – Concentração de Gases Dissolvidos(34)	48
Tabela 3 – Relação de Gases para Análise de Rogers(34)	50
Tabela 4 – Diagnóstico para Análise de Rogers(34)	50
Tabela 5 – Relação de Gases para Análise de Dornenburg(34)	51
Tabela 6 – Limites dos Trapezóides que representam as variáveis linguísticas do gás CH ₄	55
Tabela 7 – Limites dos trapezóides que representam as variáveis linguísticas do gás C ₂ H ₄	55
Tabela 8 – Limites dos trapezóides que representam as variáveis linguísticas do gás C ₂ H ₂	56
Tabela 9 – Concentração dos gases chave no transformador TR01	63
Tabela 10 – Concentração dos gases chave no transformador TR02	66

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGD	Análise de Gases Dissolvidos
ANSI	American National Standards Institute
Hz	Hertz
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
kV	Kilovolts
kVA	Kilovolts-amperes
MVA	Megavolts-amperes

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.2	Desenvolvimento do Trabalho	18
2	ANÁLISE DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	19
2.1	Transformadores de Potência	19
2.1.1	Falhas em Transformadores de Potência	23
2.1.1.1	Sistemas de Isolação Sólida	24
2.1.1.2	Sistema de Isolação Líquida	26
2.2	Diagnóstico de transformadores de potência	29
2.3	Análise de Gases Dissolvidos aplicada a Transformadores de Potência	32
3	SISTEMAS DE LÓGICA FUZZY	38
3.1	Lógica Fuzzy	38
3.1.1	Introdução	38
3.1.2	Conjuntos Fuzzy	40
3.1.3	Função de Pertinência	41
3.1.4	Definições e Operações	43
3.1.5	Propriedades Algébricas	44
3.1.6	Relação Fuzzy	45
3.1.7	Sistemas Fuzzy	45
4	METODOLOGIA PROPOSTA PARA DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	48
4.1	Utilização das Normas	48
4.1.1	Método de Rogers	49
4.1.2	Método de Dornenburg	50
4.1.3	Método de Duval	51
4.2	Programa Computacional Desenvolvido	53
4.3	Implementação da Lógica Fuzzy	54
4.4	Implementação da Lógica Direta	59
4.5	Estudos de Caso	62
4.5.1	Transformador TR01 (25MVA)	62
4.5.2	Transformador TR02 (33,25MVA)	66
5	CONCLUSÃO	72

Referências	74
------------------------------	-----------

1 Introdução

É consenso que o fornecimento de energia tornou-se um serviço essencial e de extrema importância. Em uma era de tecnologia e com uma busca constante de informações em um mundo cada vez mais integrado, qualquer suspensão no fornecimento pode se tornar um verdadeiro caos, implicando em graves desdobramentos em diversas áreas.

Assim sendo, torna-se vital manter o fornecimento de energia. Grande parte dos investimentos feitos numa implantação e operação de um sistema elétrico está concentrado na compra e manutenção dos transformadores de potência. O funcionamento destes equipamentos deve ser constantemente monitorado, com eficiência, objetivando evitar a retirada do mesmo devido a uma ocorrência de falha ou mesmo perda de eficiência na transmissão de energia (1).

Um transformador de potência é definido como um equipamento elétrico estático que, por indução eletromagnética, transforma tensão em corrente alternada entre dois ou mais enrolamentos, sem mudança de frequência, segundo a ABNT (2), enquanto a IEC define o mesmo como um equipamento estático, com dois ou mais enrolamentos, que, por indução eletromagnética, converte um sistema de tensão e corrente alternada em outro sistema, sendo este, geralmente, de tensão e corrente diferentes do sistema original, mantida a frequência. De acordo com a IEC, esta conversão visa à transmissão de potência elétrica.

Em uma terceira definição, que leva em consideração a função de controle do transformador de potência, o mesmo é definido como um equipamento estático, desprovido de partes sujeitas a movimento contínuo, que transfere potência entre circuitos por meio de indução eletromagnética em sistemas elétricos, segundo o padrão ANSI e IEEE (1).

Empresas do setor elétrico (fabricantes, transmissoras e distribuidoras) tem focado seus esforços e proposto pesquisas na área de monitoramento destes transformadores sem a necessidade de desligamento dos mesmos, conhecido como monitoramento *\emph{on-site}*. Pretende-se criar aplicações práticas, implementações reais que possam realizar esta tarefa de monitoramento de forma eficiente, criando-se sistemas de diagnóstico passíveis de análises através de saídas, relatórios, que indiquem aspectos importantes na análise do funcionamento de um transformador (3) (4).

Para transformadores de potência imersos em óleo, caso de uso central deste trabalho, um dos aspectos mais importantes na análise da condição do mesmo refere-

se ao sistema de isolamento presente. O monitoramento da condição deste sistema de isolamento está diretamente relacionado às falhas incipientes do mesmo. Este sistema de isolamento é basicamente composto por dois ítems principais: parte sólida (papel/celulose) e parte líquida (óleo) (5)

O óleo presente no sistema de isolamento de um transformado elétrico está em constante deterioração devido as reações de oxidação. Porém alguns fatores podem alterar o desgaste natural, acelerando o processo de deterioração do mesmo, entre eles:

- a) Presença de compostos metálicos;
- b) Oxigênio;
- c) Alto teor de água;
- d) Calor excessivo

O processo de deterioração causa uma alteração física no óleo, percebendo-se a mudança na sua cor característica (amarelo pálida), e em um estágio mais avançado, pode provocar a formação de composto ácido ou até mesmo a precipitação de borra devido a oxidação.

Alguns gases também podem ser formados, gases dissolvidos no óleo, resultado do processo natural de envelhecimento de um transformador de potência. Porém sua quantidade aumenta devido a ocorrência de fatores externos ou internos como descargas de corona, sobrecargas, arco elétrico, centelhamento de baixa energia, um sobreaquecimento no sistema de isolação ou mesmo falhas nos motores das bombas. Qualquer um dessas ocorrências altera o sistema de isolamento. Na maioria dos casos, estas decompõem os materiais e conseqüentemente ocorre a formação de gases de diversos tipos. Caso o transformador apresente uma falha, e este permanecer em operação, corre-se o risco de causar sérios danos ao equipamento ou mesmo inviabilizá-lo. Com o alto custo de um equipamento como esse, é de suma importância que as possíveis falhas sejam detectadas em seu estágio inicial de desenvolvimento, permitindo assim tomadas de decisão que evitem a perda total do transformador ou mesmo de um prejuízo causado pelo não funcionamento do mesmo, em caso de uma retirada não programada.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um sistema especialista capaz de auxiliar no diagnóstico de transformadores de potência por meio de análises de gases utilizando uma metodologia *fuzzy* aplicada ao triângulo de duval. O sistema fornece um

diagnóstico mais preciso ou mesmo disponibiliza maior quantidade de informações relativas ao estado operacional do mesmo e assim colaborar para:

- a) Evitar falhas no transformador;
- b) Reduzir os custos por meio de manutenção baseado no histórico do transformador;
- c) Estender a vida útil do transformador;
- d) Adias despesas de capital;

A vantagem identificada na aplicação de lógica *fuzzy* neste trabalho é a possibilidade de se obter um diagnóstico mais completo, que fornece, além do resultado qualitativo da causa do problema, uma saída quantitativa do nível de pertinência de cada possível causa. Outra vantagem é a possibilidade de visualização da evolução do estado operativo do equipamento ao longo do tempo, o que auxilia o especialista na análise preditiva do equipamento.

Com o desenvolvimento da humanidade e o crescente uso da tecnologia para resolver problemas diários, é natural o aumento na demanda por energia elétrica. Diversos setores (financeiro, segurança, etc) podem sofrer sérias conseqüências decorrentes de falhas ou anomalias no fornecimento de energia. A qualidade da energia é subjetiva e varia por diversos fatores e sendo assim, criou-se órgãos responsáveis pela definição de alguns parâmetros de qualidade e continuidade operacional de todos o setor elétrico do país, englobando geração, fornecimento e distribuição. Padronizado, uma falha ou má qualidade no fornecimento pode acarretar penalidades severas a qualquer concessionária que não atender as exigências.

Diante do cenário imposto, as concessionárias vêm-se na obrigação de traçar planos para evitar a ocorrência de falhas ou má qualidade da energia. Muitas delas procuram ter informações que possam precisar ou mesmo informar aspectos que determinem a provável ocorrência de uma falha, quantidade, intervalos e até mesmo o histórico da análise de cada equipamento. Muitos estudos estão sendo feitos e diversas metodologias podem ser utilizadas para o monitoramento e a obtenção de dados de falhas.

Em um sistema elétrico, os transformadores de potência, são considerados os componentes mais caros. Eles determinam as condições de potência e corrente de um circuito elétrico e atuam na isolação do mesmo, entre outras funções. São importantes para realizar a interligação de subsistemas com diferentes níveis de tensão. Além de seu elevado custo de aquisição, por muitos anos a manutenção preventiva desses transformadores consistiam em inspeções, testes e ações periódicas em intervalos de

tempo normalmente sugeridos pelo fabricante ou determinados através de experiência prática, o que consistia em um elevado risco para o sistema. Em um procedimento padrão realizava-se testes de rotina e execução de serviços como medição de perdas dielétricas; de resistência de isolamento e dos enrolamentos; análise físico-química e cromatográfica do óleo; monitoramento manual ou automático da temperatura e do carregamento; tratamento, troca ou a regeneração do óleo isolante; limpeza dos terminais; e outros.

Segundo (6) , o monitoramento como técnica ou processo, pode ser definido como uma avaliação das características do equipamento capaz de fornecer a necessidade ou não de uma manutenção preventiva em um transformador antes que ocorra séria deterioração, desligamento ou para estimar a saúde da máquina.

Diversas técnicas de monitoramento das condições operativas de transformadores de potência são utilizadas. Este trabalho será focado na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante (AGD). Dentre as sugeridas em (7) destacam-se:

- a) Análise de gases-chave;
- b) Análise de Döernenburg;
- c) Análise de Rogers;

Para as apresentadas em (8) destacam-se:

- a) Análise de relação de gases
- b) Triângulo de Duval

Dentre as técnicas acima apresentadas, destaca-se neste trabalho o Triângulo de Duval.

Uma má política de monitoramento pode acarretar em diversos problemas, dentre eles:

- a) Altos prazos para reparo e transporte na ordem de meses;
- b) Nem sempre se tem um equipamento reserva, causando a interrupção no fornecimento de energia;
- c) Alto custo de aquisição de um transformador de potência;
- d) Alto custo de manutenção;

Em suma, o monitoramento desses transformadores deve contemplar e realizar duas principais funções: aquisição de dados e determinação de diagnóstico. A primeira é possível através de diversas tecnologias, envolvendo sensores, dispositivos digitais ou analógicos e técnicas específicas de aquisição de dados. O segundo diz respeito a análise em si dos dados coletados, feito normalmente por um especialista na área. Existe uma forte tendência a substituição da análise do especialista por um sistema capaz de realizar o mesmo diagnóstico de forma automatizada. Este sistema automatizado deve ser capaz de agregar, preferencialmente, diversas técnicas inteligentes de diagnóstico e incorporar também conhecimentos de especialistas (9) (10).

O sistema especialista desenvolvido será responsável pela análise dos dados registrado, AGD, de cada transformador informando a condição do mesmo, para futuras tomadas de decisão. O sistema irá possibilitar dentre outras coisas:

- a) Possibilitar um entendimento dos diagnósticos e a causa de suas falhas;
- b) Possibilitar uma melhor análise e validação dos métodos utilizados;
- c) Avaliar o padrão de falhas nos transformadores;
- d) Comparar os resultados obtido em métodos distintos para determinar uma melhor metodologia na detecção de falhas;

1.2 Desenvolvimento do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma. No capítulo 2, abordam-se a importância e as opções do monitoramento de transformadores. No capítulo 3 são discutidos os métodos desenvolvidos de análise dos gases dissolvidos no óleo de transformadores, baseados em sistemas nebulosos *fuzzy* e análise diretas de acordo com a norma; resultados de implementação, são apresentados no capítulo 4 bem como os algoritmos desenvolvidos para a diagnóstico. O capítulo 5 apresenta a conclusão e sugestões para futuros trabalhos.

2 Análise de Transformadores de Potência

2.1 Transformadores de Potência

Os transformadores de potência são equipamentos com elevador fator de potência e alcançam uma elevada eficiência na transferência de energia. São bastante utilizados com intuito de ajustar, de diversas maneiras (rebaixando, elevando, corrigindo impedância, etc.), as tensões elétricas. Existe uma divisão na categoria dos transformadores sendo considerados de larga potência aqueles utilizados na transmissão de energia elétrica com potência de 5 até 300 MVA e com alta tensão de até 765kV.

Porém, independente da categoria do transformador ou da quantidade de kVA, eles devem seguir um padrão de construção. O que difere cada transformador é o grau de sofisticação com as quais esses padrões são atingidos. O processo de fabricação de um transformador é inerente de cada fabricante, sendo comum o padrão de duas linhas de fabricação: transformadores de distribuição e de larga potência (11). Transformadores de distribuição apresentem potência aparente de 1 até 5 MVA, enquanto os transformadores de larga potência são muito utilizados nas linhas de transmissão de 60 Hz, padrão comum do sistema elétrico brasileiro. Estes podem ser monofásicos ou trifásicos conforme ilustrado na Figura 1 . Para sistemas que demandam alta potência os transformadores monofásicos são mais indicados pelos seguintes fatores:

- a) Reduz as dimensões do equipamento;
- b) Reduz a ocorrência de uma eventual falha;
- c) Maior facilidade na manobra, em caso de necessidade de retirá-lo de operação;

Fatores esses, que garantem uma maior segurança da equipe de manutenção e um menor tempo de interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Figura 1 – Transformadores de potência monofásicos e trifásico - Transformador monofásico (à esquerda) e trifásico (à direita) (12).



Grande parte dos investimentos referentes a implantação e operação dos sistema elétrico são aplicados na aquisição dos transformadores de potência, como o ilustrado na Figura 2 (13).

Figura 2 – Configuração construtiva de um transformador de potência

É necessário manter uma eficiente rotina de monitoramento, que possa assegurar o estado de funcionamento de equipamentos tão representativos. A equipe de manutenção deve mensurar a integridade operacional em intervalos pré-definidos, e assim evitar a ocorrência de falhas e defeitos que retirem o transformador de operação. A falha de um equipamento de tamanha importância gera custos com manutenção, além de interrupções de atendimento de unidades consumidoras de energia elétrica. Em sua maior parte os transformadores de potência utilizam óleo mineral para o isolamento elétrico e como agente transferidor de calor para o arrefecimento do dispositivo.

Os transformadores de potência, durante sua operação, são submetidos a esforços térmicos, elétricos e mecânicos, que podem dar origem a gases dissolvidos no óleo mineral de sua composição, que por sua vez afetam diretamente as propriedades dielétricas de todo o isolamento. Assim sendo, as condições de isolamentos sólidos e líquidos devem ser monitoradas e avaliadas a fim de avaliar o estado operacional do mesmo. A seguir as definições padrões da composição de um transformador de potência:

- a) Núcleo: é um conjunto de empacotamento de lâminas com o intuito de reduzir o efeito Foucault, no qual correntes parasitas originadas pela indução do campo magnético alternado sobre o próprio núcleo. Corrente parasita ou corrente de Foucault, é a corrente induzida em um material condutor na presença da variação do fluxo magnético que o percorre. Quando há esse efeito, ocorrem perdas em decorrência de dissipação de energia por efeito Joule, elevando a temperatura do material. Esse arranjo na forma de empacotamento de lâminas ou placas muito finas isoladas umas das outras, aumenta a resistência no trajeto da corrente que atravessa o material que constitui o núcleo;
- b) Enrolamento: são encontrados em forma de bobinas cilíndricas formadas por condutores espiras entre os enrolamentos, define a diferença do potencial elétrico do transformador;
- c) Tanque principal: é um tanque de aço preenchido com óleo isolante, onde o conjunto de bobinas e o núcleo é imerso;
- d) Tanque de expansão de óleo: este permite a expansão do volume de óleo do transformador, responsável pelas variações de temperaturas a que o equipamento está submetido;
- e) Buchas: feitas de porcelana com a finalidade de isolar os terminais das bobinas do tanque do transformado. São do tipo condensivas, onde o interior do dispositivo de porcelana está envolvido de papel e filme metálico imersos em óleo, formando assim um capacitor. Comumente encontradas em transformadores com classe de tensão superior a 13,8 kV;
- f) Comutador sob carga: é um dispositivo eletromecânico que torna possível a variação dos níveis de tensão através da mudança dos terminais do enrolamento de regulação, sem a interrupção do serviço do transformador;
- g) Acionamento do comutador sob carga: mecanismo eletromecânico que faz a alteração da posição do comutador de acordo com as tensões desejadas;
- h) Trocadores de calor: localizados na parte externa do tanque, fazem que o óleo isolante através de alertas troque calor com o ambiente, diminuindo a temperatura do óleo;
- i) Painel de controle: é uma interface que permite o controle e a monitoração do funcionamento do transformador ao centro de operação da subestação, como corrente, temperatura do óleo isolante, descarga parciais, etc;
- j) Secador de ar: destinado a retirada de umidade do interior do transformador através de sílica-gel;

- k) Termômetros: utilizados para monitorar a temperatura dos enrolamentos e do óleo isolante;

Todos os componentes descritos acima podem fazer parte da arquitetura de um transformador de potência, porém não necessariamente o farão. Cada equipamento fabricado pode ser personalizado afim de atender necessidades específicas do comprador ou mesmo variando conforme sua aplicação, não existindo assim transformadores idênticos, exceto aqueles produzidos em série. Qualquer processo de produção de transformador pode especificar a quantidade de enrolamentos, seu sistema de comutação, refrigeração, dimensões dentre outros aspectos físicos de um transformador (12).

2.1.1 Falhas em Transformadores de Potência

Uma falha em um transformador de potência causa perda de suas características e com o tempo pode ocasionar curto-circuito nas bobinas. Essas falhas podem ser causadas por diversos fatores, dentre eles o mais comum, a deterioração do isolamento, sólido ou líquido. Fenômenos adversos podem causar essa deterioração, que muitas vezes não são visíveis, obrigando manter uma bateria de testes regular nos transformadores de potência.

É comum, em um transformador de potência em operação, a existência de campos elétricos. Esses campos existentes são aplicados sobre o material dielétrico responsável pelo isolamento entre as espiras, o que pode levar a degradação do mesmo. Outro problema comum é o aquecimento interno, causado pelas perdas elétricas, fruto da potência dissipada pelo fluxo da corrente no material condutor, perdas por histerese e correntes de *Foucault*, somado ao aquecimento natural do ambiente onde o mesmo está instalado. As vibrações e a umidade também são fatores que contribuem para redução da capacidade de isolamento.

Em um estudo de caso, as falhas nos transformadores de potência na *Hetford Inspection And Security Co.* foram analisadas durante 5 anos e foi proposta a seguinte classificação (14):

- a) Descargas atmosféricas (algumas confundidas com surtos de linha);
- b) Sobrecarga, situações nos quais os transformadores se encontram com carga acima da nominal;
- c) Sobretensões em linhas, advindas dos chaveamentos e curtos-circuitos, entre outras anormalidades da linha de transmissão;

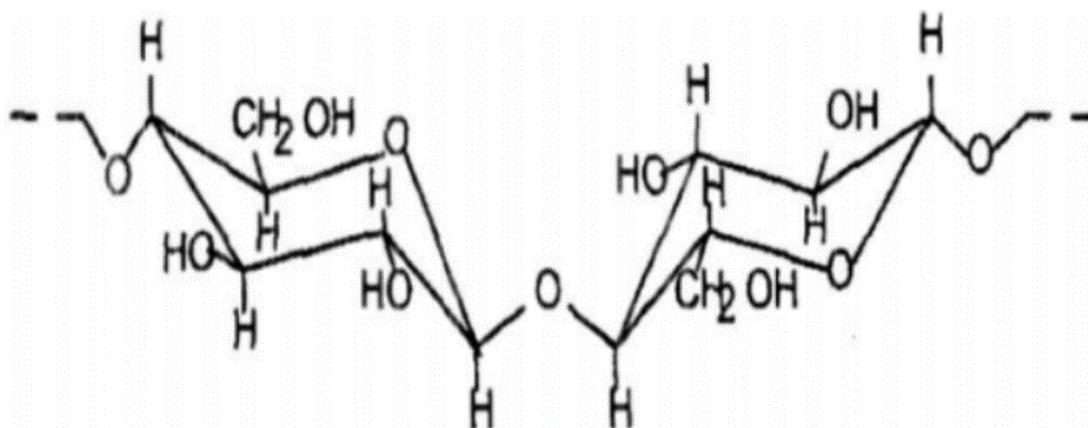
- d) Falhas na Isolação, excluindo-se as ocorridas por descargas atmosféricas e sobretensões, concentrando por oxidação, acidez, pirólise. Umidade também causa falha na isolação, porém muitas vezes é descartada. Essas falhas normalmente ocorrem em transformadores com tempo de vida superior a 18 anos;
- e) Contaminação do óleo: situações em que o óleo fica carbonizado ou perde suas características físico químicas;
- f) Operações inadequadas e manutenções impróprias, resultando no acúmulo de sujeira, umidade, ninhos de pássaros e insetos, corrosões e perdas de conexão às carcaças dos transformadores;
- g) Fogo externo com o superaquecimento do transformador pode ocorrer falha interna nos dispositivos;
- h) Erros de projeto em que foram incluídas as perdas ou cargas nominais mal especificadas, isolação do núcleo inadequada ou a suportabilidade ao curto-circuito mal dimensionada;
- i) Umidade que penetrou nos transformadores devido a falhas de vedação dos anéis ou outros orifícios, resultantes de corrosões ou vandalismos.

De posse desse estudo feito, tornou-se possível elaborar um plano de manutenção preventiva em transformadores de potência para as companhias americanas. Este plano incluía reforma, realocação para áreas com demandas menores e substituição por novos transformadores conforme necessidade atestado pelo estudo (15) .

2.1.1.1 Sistemas de Isolação Sólida

O sistema de isolação sólida é constituído por materiais a base de celulose. Em sua composição, o papel isolante, conta em sua maioria com fibras de celulose que são constituídas por um feixe de moléculas com variações no comprimento unidas por ligações de hidrogênio, conforme Figura 3.

Figura 3 – Composição química da celulose (16).



O sistema de isolamento pode ser constituído de vários tipos de papéis. As características deste sistema, dependerá do processo de fabricação e das matérias primas utilizados durante este processo. Os principais tipos de materiais celulósicos empregados na isolação dos transformadores são (17):

- Papel Kraft - feito de fibra de madeira;
- Papel Manilha - feito de fibras de madeira e cânhamo;
- Pressboard - feito de papelão com fibra de algodão;

O papel kraft é largamente utilizado por se tratar de um material de baixo custo e que apresenta bons resultados. Porém, faz-se necessário lembrar que a utilização deste material limita o projeto do equipamento a trabalhar com temperaturas relativamente baixas, entre 95 °C e 98 °C.

A limitação do uso deste material apenas em temperaturas baixas, fator que influencia de forma direta a degradação do papel isolante, fez com que, em 1950, fosse desenvolvida uma celulose termicamente estabilizada, permitindo o trabalho em temperaturas mais elevadas, passando de 110 °C e aumentando também a vida útil do sistema isolante. Na década seguinte, foi desenvolvido o papel sintético. Este por sua vez, suportava temperaturas acima de 200 °C, porém a um custo entre 10 a 50 vezes maior que o papel kraft, o que o tornava pouco atrativo.

Com a evolução das pesquisas e na busca por melhores resultados, na década de 80, foi desenvolvido um novo material intitulado pressboard. O conceito dos sistemas de isolamento em transformadores de potência imersos em líquido isolante passou por grandes mudanças, pois o material em questão suportava altas temperaturas. Tornou-se possível então a combinação de materiais isolantes resistentes a altas temperaturas,

celulose e óleo mineral, formando os chamados sistemas híbridos. Passou-se a usá-lo amplamente em transformadores de potência com altos gradientes de temperatura (16).

O oxigênio, a umidade e a temperatura degradam a celulose, afetando principalmente as propriedades mecânicas do papel. Cerca de 90% da isolação sólida dos transformadores é influenciada pela temperatura do óleo.

O conjunto papel-óleo é responsável pela rigidez dielétrica e forma o conhecido sistema isolante. Sua função é manter o isolamento entre os terminais de baixa e alta tensão, bem como entre fases. No processo, o papel isolante, após seco, é impregnado em verniz ou resina e posteriormente passado no óleo isolante. A impregnação em verniz ou resina possui diferentes características sendo necessário avaliar a necessidade para cada aplicação. O verniz retarda a penetração de água, porém permite a formação de cavidades na massa isolante, pequenas crateras, nas quais há possibilidade de formação de descargas parciais. Em resina, a formação destas crateras é diminuída, por conseguinte, a formação das descargas parciais também. É necessário sempre avaliar a extensão das descargas parciais no sistema de isolamento, independente da forma de impregnação. Esta avaliação pode ser feita através da medição do fator de potência da isolação com tensões elevadas (17).

2.1.1.2 Sistema de Isolação Líquida

Em 1982 foi utilizado pela primeira vez, pela *General Electric*, o óleo mineral como isolamento em transformadores, ou seja, possuía função dielétrica. Os primeiros óleos utilizados eram a base de parafina e deveriam atender alguns aspectos:

- a) Não deve conter água;
- b) Não deve conter materiais em suspensão;
- c) Deve possuir baixa viscosidade;
- d) Ter boa capacidade de transferência de calor;
- e) Garantir a manutenção da temperatura através de um método de refrigeração;

Os óleos a base de parafina, naturalmente oxidam formando borras insolúveis e assim aumentando a viscosidade do óleo. Com a viscosidade aumentada a capacidade de transferência de calor fica comprometida ocasionando o sobreaquecimento, diminuindo sua vida útil. Já os óleos naftênicos, mesmo oxidando com maior facilidade, não geram essas borras e por consequência não tem sua capacidade de transferência de calor diminuída. Naturalmente, então, os óleos

minerais parafínicos foram substituídos pelos óleos sintéticos naftênicos (16). Cada transformador de potência produzido possui um volume de óleo necessário em seu sistema de isolamento. Este volume depende da capacidade de carga e do tamanho físico do mesmo. Por exemplo, para um transformador de 25 kVA seriam necessários aproximadamente 76 litros de óleo, enquanto para um de 400 MVA, seriam necessários 37800 litros do mesmo óleo (18).

As propriedades físico-químicas do óleo permitem avaliar a estabilidade dos líquidos isolantes. Essas características servem não somente como parâmetro do projeto de isolamento, mas também na avaliação e acompanhamento do óleo em serviço, apontando possível contaminação, estimativa de deterioração ou determinação das condições de funcionamento do mesmo.

Para avaliar o desempenho de um transformador de potência, dentre as características apresentadas Tabela 1, a rigidez dielétrica é o parâmetro mais importante. É ela que determina a capacidade do óleo isolante em suportar a aplicação de campos elétricos sem que ocorra perda de suas características. Ela é diretamente influenciadas por alguns fatores.

Tabela 1 – Propriedades Químicas do Óleo Isolante(16).

Propriedade	Descrição
Índice de Neutralização ou Acidez	Indica a acidez no líquido isolante, responsáveis pela formação de borra que, uma vez depositada na parte ativa do transformador, dificulta transferência de calor
Teste da Cor	Indica formação de borra ou contaminações do óleo. Dificulta a dissipação de calor
Teor de Umidade	Indica quantidade de água presente no óleo
Estabilidade à Oxidação	Indica a resistência à degradação dos líquidos isolantes em contato com o oxigênio
Ponto de Fulgor	Indica a menor temperatura na qual se formam vapores inflamáveis na superfície do óleo
Ponto de Congelamento ou de Fluidez	Indica a temperatura mais baixa na qual o óleo escoar sob a ação do próprio peso
Tensão Interfacial Óleo-Água	É uma força de atração entre as moléculas existentes na superfície de separação entre a água e o óleo. Indica a presença de moléculas hidrofílicas no líquido isolante, contaminação ou incompatibilidade com algum material constituinte do equipamento
Rigidez Dielétrica	Verifica a resistência da passagem interna de corrente quando aplicada uma tensão no óleo isolante
Fator de Potência	Relacionado com as perdas dielétricas do óleo isolante

A temperatura possui um papel importante na rigidez dielétrica. Caso a temperatura do óleo sofra um aquecimento, seja ele por sobrecarga ou outros fatores, a quantidade de água dissolvida no óleo também aumenta. Quanto a temperatura do óleo baixar, parte da água dissolvida passará para o estado. A solubilidade do óleo isolante é baixa o que faz com que essa água fique livre e afete a rigidez dielétrica de forma negativa (19).

Uma forma direta de se aferir a capacidade dielétrica de um óleo isolante é disponibilizado dois eletrodos colocados a uma distância fixa e aplicar uma tensão nos mesmos. Eleva-se essa tensão até o valor de ruptura do dielétrico. O valor da tensão logo antes da ruptura é chamado de tensão de ruptura e a rigidez em kV/cm leva em conta a distância aplicada aos eletrodos.

O tamanho e a forma dos eletrodos usados para aferição podem alterar o resultado. Essas variáveis determinam o volume de líquido sujeito aos campos elétricos não uniformes. Quanto maior o volume, maior a probabilidade de existência de impurezas. Entende-se por impurezas qualquer partícula sólida de carbono, produtos formados pelo envelhecimento e ocorrência de descargas, fibras celulósicas, resíduos de processos de filtragem, água, ácidos e gases. A presença de qualquer uma dessas impurezas acarreta na diminuição da rigidez dielétrica do líquido isolante. O valor da rigidez dielétrica para óleos novos e secos é de aproximadamente 200 kV/cm (20).

A oxidação do óleo pode ocorrer devido:

- a) Ação de um campo elétrico;
- b) Concentração de oxigênio;
- c) Efeito da luz;
- d) Temperatura;

Quando ocorre a oxidação do óleo alguns ácidos são produzidos alterando as propriedades físicas e químicas do mesmo, reduzindo sua resistividade elétrica, e danificando a resistência mecânica do papel isolante aumentando assim sua perda dielétrica. A tensão interfacial do óleo é reduzida e a água torna-se mais solúvel. É de suma importância amenizar esses efeitos preservando o óleo mineral isolante e evitando a contaminação seja por umidade, impurezas ou oxigênio do ar, e assim minimizando os riscos de falhas. Conseqüentemente, em vista da diminuição do risco de falhas, as intervenções para manutenção serão controláveis e em menor número (16).

2.2 Diagnóstico de transformadores de potência

A manutenção de um transformador de potência é o conjunto de medidas e ações necessárias para a conservação ou permanência de algum item ou de uma situação, envolvendo cuidados técnicos indispensáveis ao seu funcionamento regular e permanente. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 5426 (1994), a manutenção deve ser considerada um fator estratégico e de diferencial. Não se deve limitá-la a um simples conserto de máquina. O plano de gestão de manutenção deve gerar confiabilidade e prover disponibilidade dos equipamentos ou serviços, e assim, reduzir custos de processos e do programa de manutenção definido pela organização. O plano de manutenção deve ser amplo e definir uma interligação e afinidade com todos o processo de produção da empresa (21).

Os desgastes dos transformadores de potência ocorre de forma natural, com seu uso durante um determinado período de tempo. Suas peças começam a apresentar problemas devido aos desgastes naturais de funcionamento. Sua proporção define o alcance do comprometimento da produção. Um desgaste mínimo não compromete a produção, assim como um desgaste alto aumenta consideravelmente as chances de quebra ou parada repentina daquela peça do maquinário, muitas vezes impedindo seu funcionamento.

Assim sendo, para um sistema ter confiabilidade é preciso manter um bom estado dos equipamentos nele existentes. Para tanto, métodos de manutenção devem estar presentes e devem ser aplicados afim de se manter esta confiabilidade. Segundo (21) as manutenções são divididas em três tipos:

- a) Corretiva;
- b) Preventiva;
- c) Preditiva;

As manutenções corretivas estão relacionadas a correção de uma falha existente ou uma melhoria no desempenho do equipamento. Usualmente é uma intervenção “às pressas”, não programada ou planejada que tem por objetivo evitar severas consequências ao funcionamento do equipamento e até mesmo do sistema elétrico. É uma ação para minimizar o dano já ocorrido. Ela pode ser dividida em duas categorias, segundo (21):

- a) Manutenção Corretiva Não Planejada: refere-se à correção da falha de maneira aleatória, ou seja, corresponde à correção da falha ou do desempenho menor

que o esperado após a ocorrência do fato. Implica em altos custos, pois causa perdas de produção e a extensão dos danos aos equipamentos é maior.

- b) **Manutenção Corretiva Planejada:** refere-se a correção através do acompanhamento do equipamento, ou pela decisão preferencial de se operar até que a ocorra uma falha.

Por outro lado a manutenção preventiva visa reduzir ou até evitar a ocorrência de falhas ou perda de desempenho do equipamento. Este tipo de manutenção tenta restaurar a condição do equipamento, evitar falhas inesperados que podem causar paralisações prolongadas ou uma perda do equipamento. É uma manutenção planejada, baseado em dados obtidos previamente, através de um monitoramento contínuo do equipamento com análises e coleta de dados em intervalos definidos (21).

Determinar este intervalo tornou-se um ponto importante na manutenção preventiva, e quanto bem planejado e implantado gera uma economia para as empresas envolvidas e um rápido retorno dos investimentos feitos no estudo de implantação (22) .

E por último, a manutenção preditiva é o acompanhamento das variáveis ou parâmetros que indicam o desempenho dos equipamentos, de modo sistemático, com o objetivo de definir a necessidade ou não da intervenção. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 5462 (1994), manutenção preditiva é a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejado, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

É natural que a necessidade de previsibilidade e disponibilidade dos equipamentos responsáveis pela transmissão e geração de energia aumente, visto que a tendência na demanda aumente cada dia mais. Planejamento e controle são as bases para uma efetiva tomada de decisão, tanto na produção como nos negócios. Em posse de informações confiáveis é possível garantir de forma segura a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos em um sistema elétrico. Assim sendo utilizar-se-á mais frequentemente manutenções preventivas e preditivas (23) (24).

O setor produtivo está em constante busca de maximização de seus lucros diante do cenário capitalista no qual nos encontramos. O lucro nada mais é que aspectos relacionados a produção, critérios de padronização, qualidade, baixo custo e competitividade. Um efetivo gerenciamento dos custos, uma diferenciação do produto ou serviço podem produzir uma vantagem competitiva. Para manter este cenário, não basta aumentar a disponibilidade dos equipamentos produtivos, mas também diminuir custos de manutenção, relacionados a intervenções ou interrupções na geração e

distribuição de energia. Em suma, deve-se aumentar a confiabilidade do sistema como um todo (25).

Várias ferramentas podem ajudar na busca incessante por um cenário perfeito de manutenção. Uma combinação de sistemas inteligentes e corpo técnico competente pode ajudar nesta busca. Pode-se então focar a preocupação com segurança e estabilidade, ou seja, tornar a tecnologia de diagnóstico de falhas o foco da atenção da manutenção em equipamentos (26).

Porém, é evidente que empresas maiores largam na frente ao ter os recursos para desenvolver técnicas avançadas de manutenção, principalmente manutenções preditivas, baseadas em condições conhecidas (27). Assim sendo, a adoção dessas técnicas como meio de manutenção pode reduzir gastos destinados à preservação dos equipamentos de fundamental importância. Claramente, isso acontece pois com a manutenção preditiva, todo procedimento ou intervenção é realizada com planejamento, permitindo que o faça em momento oportuno, reduzindo assim os custos de produção. Seria ideal tornar essa manutenção preditiva um trabalho rotineiro ou até mesmo automatizado, facilitando o gerenciamento do equipamento e auxiliando na gestão da produção.

Atualmente a tecnologia nos provê com diversas soluções para automatização do processo controle de manutenção os chamados Sistemas Especialistas (SE), que nada mais são que sistemas computacionais, onde determinada atividade ou processo é transformado em linguagem computacional com a ajuda de um grupo de especialistas na área atacada. Este programa deve ser responsável pela integração e processamento de informações obtidas de diversas formas.

Um SE tem por tarefa realizar a inferência ou raciocínio por meio do conhecimento armazenado e da entrada de variáveis específicas, apresentando como resultado o caminho para uma determinada ação que auxilia o usuário no planejamento e na tomada de decisão. Esses sistemas fazem parte de um ramo da Inteligência Artificial. Em essência, verifica-se que os Sistemas Especialistas são favoráveis para a gestão da organização e podem ser aplicados em diversas áreas.

Com a ajuda de consultores detentores do conhecimento da área de atuação foco do problema, é possível construir um sistema especialista eficiente, que produza diagnósticos, condutas, sugestões, auxilie gestores na tomada de decisão, que possa prover informações úteis, obtidas da combinação de conhecimentos e regras armazenadas previamente (28). Através do conhecimento adquirido, armazenado, e o rápido raciocínio de uma máquina os Sistemas Especialistas se são considerados uma fonte confiável de informações onde gestores podem basear suas decisões para uma ação imediata ou antecipada sendo a situação de emergência uma exceção (29).

Uma diversidade de informações, quantitativas e qualitativas, devem ser processadas por um sistema especialista. É de fundamental importância o SE ser capaz de promover interações e combinações de variadas formas dessas informações e assim obter diferentes resultados. Todo o processo deve ser feito através de inferências sobre todos os conhecimentos adquiridos. A capacidade do sistema especialista em demonstrar e detalhar como o resultado foi obtido demonstra eficiência, embasamento e gera confiança para se obter uma melhor análise e avaliação do resultado pelo usuário (30).

Outro ponto importante, é destacar que o sistema deve ser capaz de armazenar resultados e análises previamente feitos, pois o histórico é de fundamental importância para análise da evolução do estado de um transformador de potência. Mais uma vez, fato esse que facilita a tomada de decisão pelo responsável pelo monitoramento, mesmo que não o tenha acompanhado desde o primeiro momento.

Em suma, espera-se de um sistema especialista, as seguintes características segundo (31):

- a) Habilidade em utilizar conhecimento para realizar tarefas ou propor soluções;
- b) Capacidade de trabalhar com problemas complexos através de associações e inferência;
- c) Habilidade de armazenar e processar um grande quantidade de informações;

Ou seja, espera-se assim de um sistema especialista a capacidade de aprender, ou seja, ter a habilidade de absorver novos conhecimentos de forma automática ou com a intervenção do especialista na área. Deve-se possibilitar certa flexibilização, provendo de forma eficaz e eficiente mudanças e correções que tornem o sistema mais confiável, pois o escopo sempre é passível de alterações de acordo com as necessidades e exigências. Essas são as características indispensáveis de um sistema especialista com a finalidade de reproduzir e melhorar a qualidade do manutenção preditiva de um sistema produtor.

2.3 Análise de Gases Dissolvidos aplicada a Transformadores de Potência

Um dos meios mais confiáveis para se avaliar a integridade de um equipamento elétrico é através do monitoramento das descargas parciais. As descargas parciais aparecem quando o material isolante é submetido a grandes valores de diferença de potencial, gerando um campo elétrico, e assim elétrons ionizados em espaços vazios

deflagram as descargas parciais. O local onde ocorrem as descargas parciais definem o tipo da mesma. Caso ocorra no ar em torno do condutor, é chamado de efeito corona ou coroa. Para as descargas que ocorrem dentro do equipamento, são conhecidas como descargas parciais, podem estas ocorrerem nas cavidades ou nas bolhas existentes no interior do material dielétrico. As descargas parciais são assim denominadas pelo fato de não percorrerem o caminho total entre os condutores do material dielétrico (32).

As descargas parciais são responsáveis pela deterioração do material dielétrico e maior causador das falhas no isolamento sendo extremamente prejudicial para o equipamento como um todo. Essa deterioração pode ser causada por diversos fatores, dentre eles, o calor gerado, agentes oxidantes, ondas eletromagnéticas todos originados pelas DPs.

A unidade para medir descargas parciais é o pico-Coulomb (pC), isto porque a carga elétrica é proporcional à energia destrutiva liberada no local da DP. A norma IEC 60270 (2011) faz referência à medida de descargas parciais em sistemas e equipamentos elétricos com tensões alternadas até 400 Hz. Portanto, descargas parciais são geralmente iniciadas se a intensidade do campo elétrico dentro do espaço vazio exceder a intensidade do campo do gás contido nesse espaço. Esse fenômeno cria um pulso de carga com duração menor que 1 μ s. O surgimento de freqüências de limites de impedância de transferência $Z(f)$ decrescem com uma taxa de 6 dB a partir do valor de pico do filtro nessa faixa.

Segundo a norma IEC60270 (2011), a combinação com o dispositivo de acoplamento, tipo de instrumento que constitui um sistema de medição de largura de banda de DP, que é caracterizada por uma impedância $Z(f)$ de transferência terem valores fixos do limite inferior e as freqüências superiores f_1 e f_2 nas Equações 2.1 e 2.2, e atenuação adequada abaixo de f_1 e acima de f_2 . Os valores recomendados para f_1 , f_2 e Δf são: $30\text{kHz} \leq f_1 \leq 100\text{kHz}$; $f_2 \leq 500\text{kHz}$; $100\text{kHz} \leq \Delta f \leq 400\text{kHz}$; e f_c é determinado como freqüência central da DP.

$$\int f_c = \int f_1 + f_2/2 \quad (2.1)$$

$$\Delta F = f_2 - f_1 \quad (2.2)$$

Monitorar e medir as descargas parciais é umas das ferramentas mais úteis e confiáveis no diagnóstico de transformadores de potência. Através do monitoramento é possível identificar desgastes dos materiais isolantes ou mesmo defeitos que podem

ocorrer no mesmo, e assim evitar interrupções repentinas e/ou falha no fornecimento de energia. Alguns fatores podem interferir na detecção das DPs e devem ser levados em considerações no estado de monitoramento. Ruídos são os principais dificultadores na detecção destes sinais característicos de possíveis falhas, e conseqüentemente sua caracterização (25).

Seguem algumas formas de detectar a emissão destas descargas parciais:

- a) Emissão acústica;
- b) Medição óptica;
- c) Medida elétrica;
- d) Análise química;

Este trabalho concentra-se na análise química dos gases dissolvidos (AGD). A análise físico-química e a utilização de medição de gases dissolvidos em óleo isolante, foi, na década de 80, amplamente utilizadas pelas empresas como principal técnica de manutenção preditiva. Essas empresas tinham como objetivo acompanhar regularmente as condições do isolamento elétrico de transformadores de potência imersos em óleo mineral avaliando a condição de operação do sistema, e assim possibilitar a identificação de possíveis falhas. As falhas podem ser identificadas pelas Dps em seu interior ou pelo sobreaquecimento do isolamento, e podem ser obtidas com o equipamento em operação normal, seja por amostragem do óleo periodicamente, ou por monitoramento contínuo.

O óleo presente no sistema de isolamento produz diversos gases, quando submetido a variação de temperatura esses gases tendem a se manter dissolvidos neste mesmo óleo. Uma falha está diretamente relacionada com as temperaturas esperadas em função de seu funcionamento. Assim sendo, o sobreaquecimento pode determinar a severidade de comprometimento do isolamento. A ruptura da rigidez dielétrica do óleo, devido ao surgimento de descargas parciais, pode ser associadas com as temperaturas de formação do arco em função de sua intensidades.

Foram então definidas relações entre temperatura, processo de falha e sua intensidade onde existe uma maior probabilidade da ocorrência de um determinado problema. Cada tipo de falha tem por característica quantidade relativas de gases dissolvidos no óleo, sendo possível estimar os processos envolvidos e sua provável falha (19).

A detecção de certos gases gerados no óleo do transformador em operação é comumente a primeira indicação de seu mal funcionamento. Descargas de baixa e alta energia e sobreaquecimento são alguns dos mecanismos de falha que podem ser

identificados através desta análise. A ocorrência destes eventos pode resultar na decomposição dos materiais isolantes e conseqüente formação de vários gases combustíveis e não combustíveis. A operação de transformadores com grande quantidade de gases combustíveis, não é uma condição normal, mas pode acontecer, desde que investigado e avaliado os possíveis riscos desta operação (IEEE C57.104, 2008). A identificação de uma condição anormal requer a avaliação da quantidade de gases gerados presentes e a sua taxa de geração ao longo do tempo. Um transformador que não foi submetido a nenhum tipo de análise de gás, pode ao longo dos anos ter sido submetido a várias perturbações decorrendo da formação de grandes quantidades de gases combustíveis, o que representa um grande risco para a operação (32).

A temperatura de decomposição do óleo, e a conseqüente formação de gases, determina se no transformador pode estar ocorrendo uma falha. Por exemplo, falhas de origem elétrica, do tipo descargas contínuas ou condição de arco elétrico, podem levar a temperatura do óleo na região em torno desta descarga a níveis elevados, alcançando 1800°C, e levar à formação significativa de acetileno (C_2H_2).

Para temperaturas entre 150°C e 400°C os gases mais significativos são os de baixo peso molecular como o hidrogênio (H_2) e o metano (CH_4), com concentrações mais elevadas de metano. Um aumento mesmo que relativamente pequeno de temperatura faz com que a concentração de hidrogênio seja superior a do metano. Assim a relação entre os dois gases é totalmente alterada. O valor desta relação é uma evidência para discriminar entre falhas térmicas de baixa intensidade. Estes exemplos embora simples e parciais ilustram os mecanismos básicos da metodologia de diagnóstico de falhas através dos gases dissolvidos. Estes gases são produzidos em função da degradação do óleo do transformador e do material isolante, sendo o primeiro indício de mau funcionamento do equipamento (19).

Para a detecção de uma falha os seguintes passos devem ser seguidos, segundo (32):

- a) Detecção: detectar a geração de algum gás que excede as quantidades consideradas normais e utilizar critérios apropriados que possam identificar as possíveis anormalidades que por ventura estejam ocorrendo;
- b) Avaliação: avaliar o impacto desta anormalidade na serviçabilidade do transformador, usando um conjunto de critérios ou recomendações;
- c) Ação: recomendar ação, que vai desde a confirmação da existência da falha com análise suplementar, redução da carga, ou até mesmo a retirada da unidade de serviço.

Existem duas formas para se analisar os gases: primeiramente levando em consideração a relação entre os gases, onde estabelece-se faixas de valores prováveis para a ocorrência de determinados tipos de falhas e a segunda levando em conta a formação do gás mais significativo para aquele tipo de falha, também conhecido como gás chave. Um largo esforço está ocorrendo para determinar melhores métodos desenvolvidos a partir de técnicas de inteligência artificial, que levam em conta os critérios historicamente definidos, ou ainda, dados históricos de diagnósticos obtidos para determinados equipamentos.

Os principais gases gerados a partir da operação de um transformador são do tipo hidrocarbonetos (metano CH_4 , etano C_2H_6 , etileno C_2H_4 , acetileno C_2H_2), hidrogênio (H_2) e óxidos de carbono (CO e CO_2). Outros gases podem ser encontrados no processo de operação do transformador de potência, porém são classificados como gases não-falha como o nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) (33).

Vários estudos tentam determinar a origem da falha em razão da quantidade dos gases existentes no óleo isolante e sua severidade. As principais causas são: origem térmica (sobreaquecimento) ou elétrica (corona ou coroa). Porém as falhas térmicas de baixa intensidade também podem prejudicar o funcionamento e o rendimento de um transformador de potência de deve ser acompanhada através da relação desses gases (33).

Estas relações entre gases em proporções definidas pelas variações de temperatura são a base da metodologia de análise e diagnóstico da condição de isolamento para detecção de falhas em transformadores. Portanto, os métodos de diagnóstico do óleo mais utilizados, em função da presença de gases são:

- a) IEEE 57.104 (2008) (34)
 - a) Método Döernenburg;
 - b) Método de Rogers;
- b) IEC 605 (2007) (8)
- c) Triângulo de Duval

Os métodos para diagnóstico do óleo apresentam relações entre os gases e estas relações determinam uma condição do estado do isolamento. No padrão IEEE 57.104 (2008) são realizadas duas relações baseadas nos cinco gases, onde:

- a) Relação 1: CH_4 / H_2
- b) Relação 2: C_2H_2 / C_2H_4

- c) Relação 3: C_2H_2 / CH_4
- d) Relação 4: C_2H_6 / C_2H_2
- e) Relação 5: C_2H_4 / C_2H_6

Com a publicação da IEC 605 (2007) e o banco de dados IEC TC 10 foi possível realizar novas interpretações da análise do gás no óleo e com isso possibilitar melhorias nos resultados dos diagnósticos, através de cinco diferentes tipos de falhas. As principais relações de gases têm sido aplicadas para diagnósticos com novos limites de códigos e os gases adicionais indicados para especificar os casos de falhas. Outras definições mais precisas de concentrações normais ou de alarme são destacadas, pois estas falhas podem ser identificadas por inspeção visual do equipamento depois da falha ter ocorrido em operação.

Os exemplos discutidos na IEC 605 (2007) ou IEC 60599 definem os possíveis diagnósticos para um transformador de potência:

- a) Descargas parciais;
- b) Descargas de pouca energia;
- c) Descargas de grande energia;
- d) Falhas térmicas abaixo de 300 °C; e
- e) Falhas térmicas abaixo de 700 °C.

Na IEC 60599 (8) foram apresentados os cálculos dos valores típicos de concentrações de gases, os valores alarmantes (máximos aceitáveis) e taxas típicas de aumento de gás nos transformadores de potência. Além disso, foram introduzidas duas relações adicionais (C_2H_2/H_2 e O_2/N_2) para casos de diagnósticos específicos. A primeira relação é recomendada para detectar possíveis contaminações relacionadas à comutação em carga e a segunda relação para detectar aquecimento e oxidação anormal do óleo.

Os critérios de Duval foram utilizados e implementados neste trabalho e será detalhado no capítulo 3. Para os demais, serão comentados a seguir alguns aspectos pertinentes no desenvolvimento desta metodologia.

3 Sistemas de Lógica *Fuzzy*

3.1 Lógica *Fuzzy*

3.1.1 Introdução

A Lógica *Fuzzy* é um meio de se mapear um sistema com características de entrada e um conjunto de características de saída. Ela tem como objetivo modelar, de forma semelhante, o raciocínio humano, tentando imitar a capacidade de tomada de decisão e forma racional em um ambiente com diversas incertezas. É considerada uma técnica que fornece um mecanismo para manipular informações imprecisas (1).

Na Universidade de Berkeley, USA, o professor L.A. Zadeh sugeriu uma teoria alternativa aos conjuntos existentes até então, teoria essa, bem mais flexível, para atender o mundo real. Esse novo conceito de conjunto faria uma passagem mais gradual e lenta entre a não pertinência e a pertinência, e assim surgia os conjuntos *fuzzy*, cuja palavra pode ser traduzida como nebulosa.

A lógica *fuzzy* ou nebulosa pode ser comparada a lógica clássica ou booleana. A lógica clássica trabalha com a definição de conjuntos enquanto a booleana sua principal característica é dar um tratamento matemático a certos termos linguísticos subjetivos, como: “próximo”, “perto”, “alto”, “baixo” dentre outros, diretamente da lógica clássica, onde os predicados são exatos como : “igual”, “menor que”, “maior que”, “ímpar”. Assim, a lógica nebulosa não possui apenas respostas 0 e 1 ou verdadeiro e falso, e sim uma infinidades de valores, traduzidos em expressões linguísticas interpretadas como subconjuntos *fuzzy* de um intervalo unitário.

Esta característica permite a programação e armazenagem de conceitos não exatos em computadores, possibilitando a realização de cálculos com informações imprecisas, a exemplo do que fazem os seres humanos. Um exemplo disso seria a afirmação de que o triplo de uma quantidade de “aproximadamente 5” seria “aproximadamente 15”.

Com a aplicação da lógica *fuzzy* é possível através de regras naturais de raciocínio criar condições de tratar as informações lógicas, como por exemplo, “dizer” para um equipamento o que deve ser feito sob determinada condição, ou seja, SE tensão muito baixa ENTÃO desligue o motor. Isto representa a análise de uma determinada condição que terá um determinada conseqüência sin (35). Os fundamentos dessas expressões são baseados nos conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*), que permitem a manipulação de valores não precisos, expressões verbais abstratas (muito alto, longe, perto, próximo, etc).

A modelagem baseada na lógica *fuzzy* é considerada de alto grau de complexidade e faz-se necessário um grande esforço computacional para que as expressões verbais sejam convertidas em números. Essa conversão é conhecida como *fuzzyficação* e é a partir dela que uma estratégia de controle pode ser implementada. As informações de um sistema do mundo real, que podem ser captadas através de sensores e dispositivos computadorizados, sofrem esse processo de *fuzzyficação* e são transformadas por meio da definição de um conjunto de variáveis *fuzzy*, o qual atribui um domínio de abrangência. Nesta etapa são criados mnemônicos para descrever essas variáveis, como: temperatura, pressão, densidade, etc.

Trata-se, portanto, de um conjunto de informações (conhecimento do especialista), convertido em regras do tipo se ... então ... que descrevem a dependência entre as variáveis que compõem as expressões de entrada e saída.

Uma vez definidas as regras de produção e conseqüentes valores associados a elas, devemos passar para a próxima fase que é chamada de inferência que conforme (35) consiste em dois passos:

- a) Agregação, responsável pela avaliação da porção se ... de cada regra, através do operador "AND", o qual fornece o menor dos dois valores de pertinência (μ) que indica o grau de adequação de cada regra ao estado atual do sistema;
- b) Composição, responsável pela ponderação das diferentes conclusões das regras analisadas, através do operador "OR", o qual fornece o maior dos resultados.

Os resultados obtidos pela fase de inferência devem ser traduzidos em uma variável numérica, ou seja, traduzir o valor linguístico da expressão verbal para um número capaz de representar funções como mudar desligar um motor ou acionar uma válvula. Essa fase é conhecida como *desfuzzyficação*.

Os sistemas de inferência *fuzzy* são utilizados onde existem incertezas, ou quando não se possui um modelo matemático bem definido que represente aquele sistema e consiga definir o comportamento do mesmo. Através de um sistema *fuzzy* é possível abstrair modelos complexos de uma forma simples e compreensiva. Entre as vantagens da lógica *fuzzy*, pode-se citar(35):

- a) É conceitualmente fácil de entender;
- b) É flexível;
- c) É tolerante a dados imprecisos;

- d) Pode modelar sistemas não-lineares de complexidades arbitrárias;
- e) Pode ser construído utilizando conhecimento de especialistas;
- f) É baseado na linguagem natural;

Um sistema *fuzzy* permite agregar conhecimentos de diversos especialistas (por exemplo, um especialista em análise de gases e um engenheiro elétrico), o que é considerado outra grande vantagem. Entre as limitações do sistema *fuzzy*, pode-se citar:

- 1) O seu funcionamento é altamente abstrato e heurístico;
- 2) Necessita de especialista para determinar suas regras (relações de entrada e saída);
- 3) Não possui auto organizações mecanismos de auto-regulação presentes, por exemplo, nas redes neurais;

3.1.2 Conjuntos *Fuzzy*

Para a teoria de conjuntos clássica um elemento x pertence ou não pertence a um dado conjunto. Em um universo U e um elemento qualquer x , onde $x \in U$ o grau de pertinência $\mu_A(x)$ com respeito a um conjunto $A \subseteq U$ é descrito segundo a função característica:

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

Sistemas que utilizam lógica *fuzzy* são grandes aliados no desenvolvimento de sistemas de controle. O uso desta lógica possibilita a incorporação de uma certa imprecisão em um problema. A lógica *fuzzy* considera o uso de variáveis reais, do tipo: velocidade, temperatura, pressão, etc. A estas variáveis reais são associados termos lingüísticos do tipo alto, baixo, pouco baixo, etc, que são denominados *memberships*. Formalmente, um conjunto *fuzzy* A é definido por uma função de pertinência $\mu_A : [0 - 1]$. Essa função associa a cada elemento x do conjunto *fuzzy* A um grau $\mu_A(x)$ de pertinência, isto representa o grau de compatibilidade entre x e o conceito expresso por A (36):

- a) $\mu_A(x) = 1$ indica que x é completamente compatível com A ;
- b) $\mu_A(x) = 0$ indica que x é completamente incompatível com A ;
- c) $\mu_A(x) > 0$ e $\mu_A(x) < 1$ indica que x é parcialmente compatível com A , com grau $\mu_A(x)$.

A teoria *fuzzy* tem sido aplicada com sucesso em diversas áreas, destacando-se o uso em controladores *fuzzy* de usinas nucleares, refinarias, processos biológicos e químicos, em produtos como máquina de lavar, câmeras fotográficas, sistemas de ventilação, na área médica, econômica, ou seja, em qualquer área aonde é necessário trabalhar com incertezas (37). Os sistemas *fuzzy* utilizam um conjunto de regras do tipo SE... ENTÃO, formada por mapeamento de todos os estados do sistema do mundo real. Sua definição segue os seguintes passos:

- a) As variáveis de entrada sofrem um processo de *fuzzyficação*, aonde as informações são convertidas em números *fuzzy* para então ocorrer a formulação e execução de uma estratégia de controle.
- b) Efetua-se então, a inferência sobre o conjunto de regras obtendo os valores dos termos das variáveis de saída.
- c) Uma vez obtidas as variáveis linguísticas de saída pode-se aplicar a *defuzzyficação*, que consiste em converter os dados nebulosos para valores numéricos precisos.

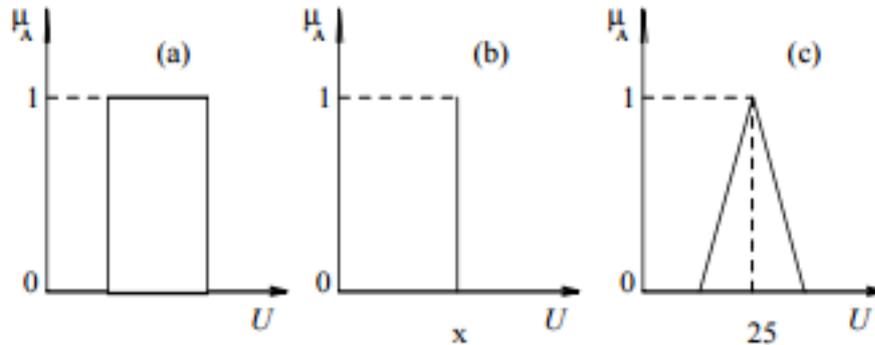
Existem diversas formas de *defuzzyficação*, como centro de massa, valor máximo, média dos máximo, que não entraremos em detalhes neste trabalho, mas podem ser vistos em (38).

3.1.3 Função de Pertinência

A função de pertinência é criada para representar algum conceito impreciso, como “ser baixo”. Uma função de pertinência μ_A associa a um dado componente “ x ” do universo de discurso “ X ”, o seu respectivo grau de pertinência em um determinado conjunto *fuzzy*. Funções de pertinência na teoria de conjuntos clássica, assumem um erro percentual onde todos os valores dentro desse erro terão fator de pertinência 1 e os demais 0 como observado na Figura 4 (a). Para casos precisos, onde assume-se apenas um valor como certo, o fator de pertinência 1 é registrado apenas no valor exato que se quer alcançar Figura 4 (b). A teoria *fuzzy* vem propor que o fator de pertinência possa assumir outros valores em um intervalo entre 0 e 1, sendo o valor 0 completa exclusão e valor 1 completa pertinência. Por exemplo, considerando-se um sistema

de controle de temperatura onde 25° é considerado quente. Em Figura 4 (c) podemos observar, através de uma função triangular, que quanto mais próximo chegarmos da função de pertinência 1, mais próximo estaremos do limite determinado.

Figura 4 – Exemplos de Funções de Pertinência



Com a utilização do novo modelo *fuzzy*, que flexibiliza e torna mais suave a transição entre 0 e 1, tornando possível assumir qualquer valor dentro deste intervalo, temos um aumento do poder da expressão da função característica. Sendo assim o modelo *fuzzy* define sua função característica como , segundo (39), sendo:

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

Assim, o conjunto *fuzzy* A em U é simplesmente um conjunto de pares ordenados:

$$A = \frac{\mu_A(u)}{u}, u \in U \quad (3.3)$$

Dentre os perfis ou funções que são utilizado para definir uma função de pertinência, temos:

- a) Trapezoidal
- b) Triangular
- c) Gaussiano

- d) Pi
- e) Beta

Uma função de pertinência possui apenas os critérios de “pertence” ou “não pertence” e “está contido” ou “não está contido”. Assim sendo, em uma função de pertinência cria-se o conceito de grau de pertinência, que permite uma transição gradual da falsidade para a verdade. Por exemplo, levando em conta um grupo de pessoas jovens, um bebê faria parte deste grupo “jovens”, enquanto um velho de 100 anos com certeza não faria. Porém, pessoas com 20,30 ou 40 anos teriam um grau de pertinência que definiria se estão “mais perto” ou “mais longe” do intervalo.

Não existe uma base formal para determinar o grau de pertinência, este é escolhido experimentalmente/empiricamente.

3.1.4 Definições e Operações

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

Conjunto Vazio:	$A = \emptyset$ se e somente se $\forall u \in U, \mu_A(u) = 0$
Complemento A'	$\mu_{A'}(u) = 1 - \mu_A(u)$
Conjuntos Iguais	$A = B$ se e somente se $\forall u \in U, \mu_A(u) = \mu_B(u)$
A subconjunto de B	$A \subset B$ se $\forall u, \mu_A(u) < \mu_B(u)$

Em suas operações, os conjuntos *fuzzy* utilizam os conceitos de norma triangular (norma-t) e co-norma triangular (norma-se). Uma norma triangular ou t-norma é uma operação, segundo (40), definida por :

$$\Delta : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1], \text{ com } \Delta(a, b) = a \Delta b \quad (3.4)$$

, tal que:

- a) $a \Delta b = b \Delta a$, (cumulativa)
- b) $(a \Delta b) \Delta c = a \Delta (b \Delta c)$, (associativa)
- c) $b \leq c \Rightarrow a \Delta b \leq a \Delta c$, (monótona crescente)
- d) $a \Delta 1 = a$ (identidade),

Já uma co-norma triangular, segundo (40) é tal que,

$$\nabla : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1], \tag{3.5}$$

satisfazendo os itens (a) a (c) acima e ainda;

e) $a \nabla 0 = a$, (*identidade*)

ambas para $a, b, c \in [0, 1]$.

Um dos exemplos mais usados de normas-t incluem o mínimo (\wedge) e o produto algébrico (\cdot). Tem-se como exemplo de norma-s o máximo (\vee) e a soma limitada (\oplus) (41).

As normas triangulares representam a união (operadores mínimos), enquanto as co-triangulares as intersecções (operadores máximo) dos conjuntos *fuzzy*, e podem ser representadas pelas equações:

União de A e B:	$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$
Intersecção de A e B:	$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$

3.1.5 Propriedades Algébricas

Utilizando as definições de união e intersecção, implementadas pelos operadores máximo e mínimo, e complemento, é possível verificar que as seguintes propriedades algébricas de conjuntos ordinários, segundo (42), também valem para conjuntos *fuzzy*:

Involução:	$(A')' = A$
Idempotência:	$A \cap A$ e $A \cup A = A$
Comutatividade:	$A \cap B = B \cap A$ e $A \cup B = B \cup A$
Associatividade:	$(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$ e $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$
Distributividade:	$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ e $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
Lei Transitiva:	se $A \subset B$ e $B \subset C$ então $A \subset C$

Observando que as funções de pertinência dos conjuntos vazio e universo são definidas como sendo 0 e 1, respectivamente, $\forall u \in U$, as seguintes propriedades também são válidas:

- a) $A \cap \emptyset = \emptyset$
- b) $A \cup U = A$
- c) $A \cup \emptyset = A$
- d) $A \cup U = U$

Com o conhecimento das propriedades algébricas pode-se entender melhor uma relação *fuzzy*.

3.1.6 Relação Fuzzy

Se A_1, A_2, \dots, A_n são conjuntos *fuzzy* em U_1, U_2, \dots, U_n respectivamente, uma relação *n*-ária é um conjunto *fuzzy* em $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$, expresso assim:

$$R = [(u_1, \dots, u_n), \mu_R(u_1, \dots, u_n)] | (u_1, \dots, u_n) \in U_1 \times U_1 \times \dots \times U_n \quad (3.6)$$

ou, mudando a notação,

$$P = \mu_R(u_1, \dots, u_n) / (u_1, \dots, u_n), (u_1, \dots, u_n) \in U_1 \times U_1 \times \dots \times U_n$$

Se R e P são relações *fuzzy* em $U \times V$ e $V \times W$ respectivamente, a composição de R e P é uma relação denotada por $R \circ P$ definida por:

$$R \circ P = [(u, w) \sup_v (\mu_R(u, v) \delta \mu_P(v, w))] ; u \in U, v \in V, w \in W$$

As relações *fuzzy* possuem o poder de generalizar o conceito das relações e representar o grau de associação de dois ou mais conjuntos *fuzzy* (39).

3.1.7 Sistemas Fuzzy

Um sistema *fuzzy* tem por objetivo modelar o raciocínio aproximado, e prover ferramentas que possam auxiliar os especialistas na tomada de decisão em um ambiente de incertezas e imprecisão. Assim sendo, esta se torna uma ferramenta capaz de armazenar informações imprecisas em linguagem natural, e apresentá-la em uma forma numérica mender(1).

Um sistema *fuzzy* é composto por um conjunto de regras do tipo:

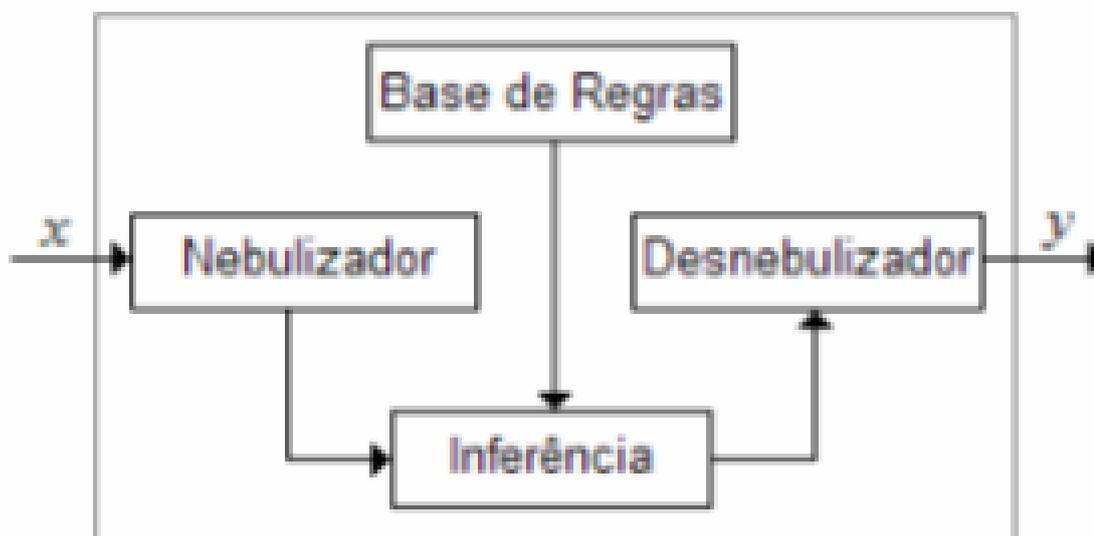
Se x É A <premissa> então y é B <conclusão >

sendo:

- a) x : variável de entrada;
- b) y : variável de saída;
- c) A e B : termos lingüísticos associados aos conjuntos *fuzzy*;

Na Figura 5 o desenho de um sistema *fuzzy*:

Figura 5 – Sistema Fuzzy



- a) Nebulizador(*fuzzyficador*): converte valores de entrada do sistema (números reais) para termos lingüísticos;
- b) Base de regras: local onde todo conhecimento sobre o domínio do problema em questão é armazenado;
- c) Inferência: manipula a base de regras;
- d) Desnebulizador(*defuzzyficador*): converte termos lingüísticos em valores de saída do sistema (números reais);

As características gerais de como obter uma decisão classificam os controladores *fuzzy*. Embora existam várias classificações (43), em sua diversidade podemos distinguir dois principais grupos: um primeiro grupo baseado nas funções de

implicação *fuzzy* e em operadores de composição para a definição da saída *fuzzy* do controlador, e um segundo, que dispensam os mesmos. Assim surgem dois nomes que denotam estas duas definições sendo o primeiro chamado de controladores do tipo Mamdani e o segundo, desenvolvido por Takagi e Sugeno, conhecido como controlador Sugeno.

Para este trabalho foi utilizado o controlador de Mamdani (44) implementada com o operador mínimo, pelas seguintes razões:

- a) Facilidade para interpretação, pois seu resultado é um conjunto *fuzzy*, ao contrário de (45) onde sua saída é uma expressão matemática;
- b) Facilidade de manutenção, pois é mais simples para abstrair problemas matemáticos em regras literais;

Este controlador tem como base o trabalho feito por Mamdani em 1973 (44), onde no algoritmo *fuzzy* do controlador cada regra é considerada uma proposição a ser avaliada. A implementação é feita utilizando regras como as citadas na seção anterior e agregadas por n regras que irão compor o algoritmo. Esta agregação resulta em um conjunto de saída *fuzzy* C , que define sua saída. Esta saída será obtida de fato após a *defuzzificação* aplicada a este conjunto. Para este trabalho foi utilizado um método comum e de largo uso para este fim, o centróide, que assegura uma superfície de controle suave e contínua.

Os módulos de nebulização e desnebulização permitem que o usuário trabalhe com variáveis de entrada de valor real e obtenha, como resposta, variáveis de saída de valor real, sendo que todo o processo de inferência é efetuado com variáveis linguísticas. Nas próximas seções esses três módulos serão melhor detalhados.

Estes sistemas nebulosos são, usualmente, usados na automação de processos que utilizam de informações imprecisas fornecidas por seres humanos e em problemas complexos, os quais requerem dispêndio de tempo e alto custo computacional, quando solucionado pela abordagem clássica. Usando-se os sistemas nebulosos, a solução é obtida, a partir do conjunto de regras de senso comum, através de um método de inferência, o que o torna simples e rápido (46).

4 Metodologia Proposta para Diagnóstico de transformadores de potência

4.1 Utilização das Normas

Ao longo dos anos, vários métodos para diagnóstico de falhas em transformadores foram desenvolvidos, de forma empírica, todos utilizando a análise de gases chaves combustíveis dissolvidos no óleo isolante. As publicações derivadas destas formas de análise transformaram-se em normas e estão em constante modificação em relação aos valores limites para identificação de falhas. Essas normas identificam relações entre dois gases, que torna-se um elemento importante para determinar as falhas.

Os métodos mais utilizados são o método de Duval, que considera concentração de três tipos de gases, o método de Döernenburg e o método de Rogers levam em consideração o nível de degradação térmica no diagnóstico de falhas. Os resultados das análises de concentrações de gases são comparados com valores pré-estabelecidos e catalogados internacionalmente, os quais indicam a intensidade do problema. Este método foi inicialmente pesquisado por Döernenburg e posteriormente desenvolvido por Rogers.

Os critérios utilizados por Rogers e Döernenburg pertencem à norma internacional IEEE C57.104 de 2008. Ambos os métodos utilizam as relações citadas, a diferença está no número de relações utilizadas por cada método. O método de Döernenburg é aplicado nos casos onde há um aumento significativo na geração de cada gás, de forma que as relações 1,2,3 e 4 possam ser comparados com os valores limites identificados na Tabela 2 . Já o método de Rogers utiliza apenas três relações entre os gases (1,2 e 5) para indicar um diagnóstico.

Tabela 2 – Concentração de Gases Dissolvidos(34)

Gás	Concentração (ppm)
Hidrogênio(H_2)	100
Metano(CH_4)	120
Monóxido de Carbono(CO)	350

Gás	Concentração (ppm)
Acetileno(C_2H_2)	35
Etileno(C_2H_4)	50
Etano(C_2H_6)	65

Foram apresentados então os cálculos dos valores típicos de concentração de gases, bem como os valores máximo aceitáveis e taxas típicas de aumento de gás nos transformadores de potência. Introduziu-se duas novas relações (C_2H_2/H_2 e O_2/N_2) para casos de diagnósticos específicos. A relação C_2H_2/H_2 possibilita detectar possíveis contaminações relacionadas à comutação em carga, e a relação O_2/N_2 pode detectar aquecimento e oxidação anormal do óleo.

As análises baseadas nas concentrações dos gases tornam-se bastante significativas quando a taxa de evolução dos gases passa ser considerada. Para tal é necessário que sejam estudadas famílias de transformadores com mesmo fabricante e carregamento semelhante. A equação da taxa de evolução é apresentada pela seguinte equação:

$$TE(\%) = (TGU - TGP) \times 100 / TGP \times IMA \quad (4.1)$$

sendo:

- a) TE(%) = Percentual da taxa de evolução
- b) TGU = Taxa do gás na última análise
- c) TGP = Taxa do gás na penúltima análise
- d) IMA = Intervalo, em meses, entre as análises

Para realização desse método deve-se proceder a análises em intervalos de tempo regulares. Deve-se ainda, para cada análise, calcular a taxa de geração do gás-chave da falha. Por fim deve-se comparar a taxa de geração obtida com a anterior.

4.1.1 Método de Rogers

No método de Rogers as relações de concentração de gases e limites de variações destas relações são utilizadas para emitir o diagnóstico do equipamento. Os gases envolvidos são CH_4 , H_2 , C_2H_6 , CH_4 e C_2H_4 . As relações utilizadas por este método são:

- a) Relação 1: CH_4 / H_2
- b) Relação 2: C_2H_2 / C_2H_4
- c) Relação 5: C_2H_4 / C_2H_6

Na Tabela 3 são apresentadas as relações dos gases para obtenção do diagnóstico e na Tabela 4 seus resultados:

Tabela 3 – Relação de Gases para Análise de Rogers(34)

Código	R1	R2	R5
0	>0,1,<1	<0,1	<1
1	<0,1	<0,1	<1
2	>0,1,<1	>0,1,<3	>3
3	>0,1,<1	<0,1	>1,<3
4	>1	<0,1	>1,<3
5	>1	<0,1	>3

Tabela 4 – Diagnóstico para Análise de Rogers(34)

Código	Sugestão de Diagnósticos
0	Unidade normal
1	Descargas parciais de baixa energia
2	Arco com alta energia
3	Sobreaquecimento - abaixo de 150°C
4	Sobreaquecimento - acima de 300°C até 700°C
5	Sobreaquecimento - acima de 700°C

É importante destacar que várias ocorrências simultâneas de falhas podem causar ambigüidade nas análises (47) .

4.1.2 Método de Dornenburg

Este método utiliza os gases CH_4 , H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 e C_2H_6 . As relações consideradas entre eles são:

- a) Relação 1: CH_4 / H_2
- b) Relação 2: C_2H_2 / C_2H_4
- c) Relação 3: C_2H_2 / CH_4
- d) Relação 4: C_2H_6 / C_2H_2

Este método requer uma quantidade significativa de gases para maior precisão do diagnóstico. Sugere a existência de três tipos de falhas básicas: decomposição térmica, descargas parciais de baixa intensidade (corona) e descargas parciais de alta intensidade (arco elétrico). Os valores dos gases obtidos nas análises são submetidos às razões R1, R2, R3 e R4 e comparados com algumas concentrações catalogadas, como mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Relação de Gases para Análise de Dornenburg(34)

Tipo de Falha	Relações Principais		Relações Auxiliares	
	R1	R2	R3	R4
Térmica	>0,1	<0,1	<0,1	>0,2
Descarga Parcial	<0,01	-	<0,1	>0,2
Arco Elétrico	>0,01,<0,1	>1	>0,1	<0,2

O critério estabelece que, para a utilização da Tabela 5, no mínimo um dos gases que compõe as relações principais tenha uma concentração superior ao dobro do valor de 2 e que para as relações auxiliares, pelo menos um dos gases tenha uma concentração superior ao constante na mesma tabela.

4.1.3 Método de Duval

O método proposto por Michael Duval em 1960 e é uma forma de representação gráfica da quantidade de gases dissolvidos no transformador de potência. Os gases utilizados na análise são o metano (CH_4), etileno (C_2H_4) e acetileno (C_2H_2) (48) .

O método consiste em determinar a presença ou não de provável falha no equipamento através da concentração de alguns gases chaves. É necessário que ao menos um dos gases apresentados na Tabela 2 esteja acima do limite apresentado.

Caso ao menos um dos gases exceda o limite, são calculadas as concentrações relativas dos gases metano (CH_4), etileno (C_2H_4) e acetileno (C_2H_2) dissolvidos no óleo isolante do equipamento através das equações abaixo.

$$\%CH_4 = 100 \times z \div (x + y + z) \quad (4.2)$$

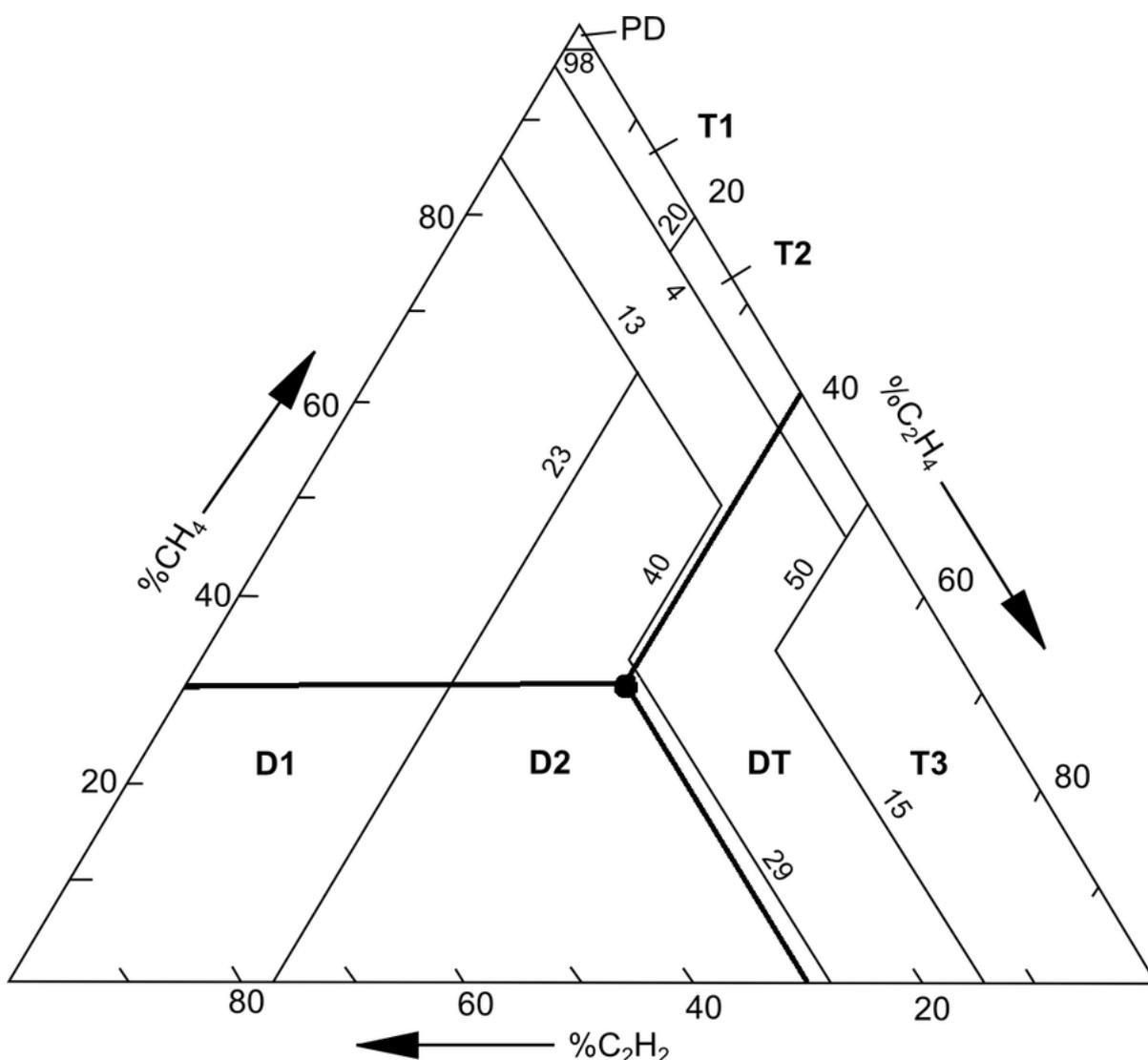
$$\%C_2H_4 = 100 \times y \div (x + y + z)$$

$$\%C_2H_2 = 100 \times x \div (x + y + z)$$

Onde x , y e z são, respectivamente as concentrações absolutas dos gases acetileno, etileno e metano medidas em ppm.

Finalmente são traçadas retas paralelas a cada lado do triângulo de Duval nos pontos de concentração calculados. A região onde essas retas se encontram indica a causa da falta segundo a metodologia do Triângulo de Duval. Na Figura 6, exemplifica-se a aplicação deste método para concentrações verificadas de 30% de metano, 40% de etileno e 30% de acetileno. O ponto de cruzamento das retas referentes a cada gás é na região D2 do triângulo, ou seja, o diagnóstico é presença de descargas de alta energia.

Figura 6 – Exemplo de aplicação do Triângulo de Duval no diagnóstico de falhas em transformadores de potência - Adaptado de (34)



Os possíveis diagnósticos apresentados na Figura 6 são:

- a) PD : descargas parciais

A entrada para utilização da biblioteca é uma lista de ensaios de um determinado transformador. Esta pode ser composta por um ensaio apenas, ou por vários ensaios. Os ensaios podem ser carregados através de um arquivo de dados simples.

Um exemplo da carga de ensaios de um transformado é demonstrado pela 8 .

Figura 8 – Exemplo de Ensaio de Transformadores

H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	CO	CO2	Diag. Campo	Análise Fuzzy	Análise Direta
32.800,00	2.397,00	1,00	1,00	187,00	313,00	590,00			
37.800,00	1.740,00	8,00	8,00	249,00	98,00	187,00			
62.600,00	10.200,00	1,00	1,00	1,00	6.400,00	103.191,00			
8.298,00	1.061,00	1,00	1,00	22,00	107,00	498,00			
9.340,00	995,00	7,00	6,00	80,00	80,00	820,00			
38.030,00	4.704,00	10,00	6,00	554,00	6,00	347,00			
33.045,00	819,00	1,00	2,00	58,00	51,00	1,00			
40.280,00	1.069,00	1,00	1,00	1.000,00	1,00	1,00			
26.789,00	18.342,00	1,00	27,00	2.111,00	704,00	1,00			
78,00	20,00	28,00	13,00	11,00	1,00	794,00			
305,00	100,00	541,00	161,00	33,00	440,00	3.700,00			
35,00	6,00	482,00	26,00	3,00	200,00	2.240,00			
543,00	120,00	1.880,00	411,00	41,00	78,00	2.800,00	D1		
1.230,00	163,00	662,00	233,00	27,00	130,00	119,00	D1		
645,00	88,00	317,00	110,00	13,00	74,00	114,00			

Para análise direta foi criado um algoritmo capaz de analisar a concentração de gases e suas relações baseado na norma. Já para a análise *fuzzy* o software *QTFuzzy* (49) foi utilizado na etapa de testes, e a lógica *fuzzy* aplicada ao Triângulo de Duval foi codificada em linguagem Java.

O *software* realiza para cada ensaio a análise direta e *fuzzy*, comparando o resultado de cada análise e uma terceira análise direta do especialista e informando as diferenças encontradas entre elas.

A seguir é melhor detalhado cada implementação utilizada internamente na biblioteca utilizada.

4.3 Implementação da Lógica *Fuzzy*

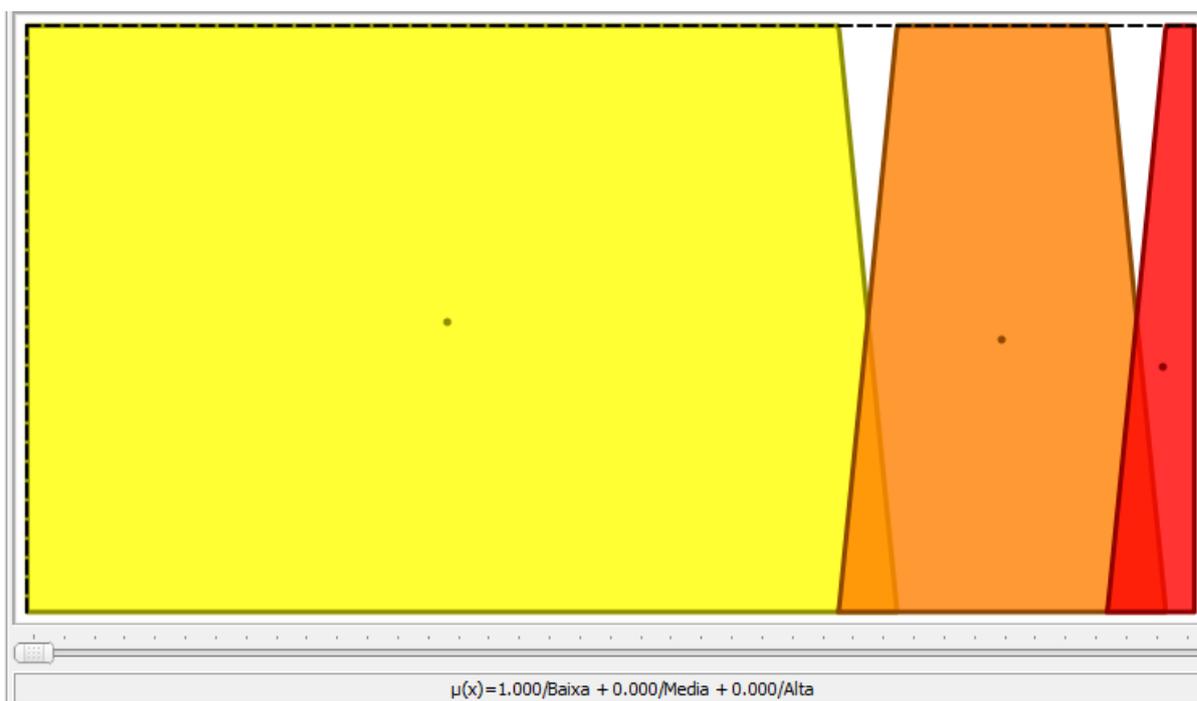
Utilizando o software *QTFuzzy* (46) o triângulo de Duval foi mapeado através da separação das variáveis de entrada CH_4 , C_2H_4 e C_2H_2 em funções de pertinência representadas pelas variáveis linguísticas: Baixa, Média, Alta e Muito Alta.

A Tabela 6 e a Figura 9 mostram as variáveis linguísticas e as funções de pertinência para o gás CH_4 respectivamente.

Tabela 6 – Limites dos Trapezóides que representam as variáveis linguísticas do gás CH₄

Variável	Limite 1	Limite 2	Limite 3	Limite 4
Baixa	0,00	0,00	69,50	74,50
Média	69,50	74,50	92,50	97,50
Alta	92,50	97,50	100,00	100,00

Figura 9 – Funções de Pertinência para o gás CH₄

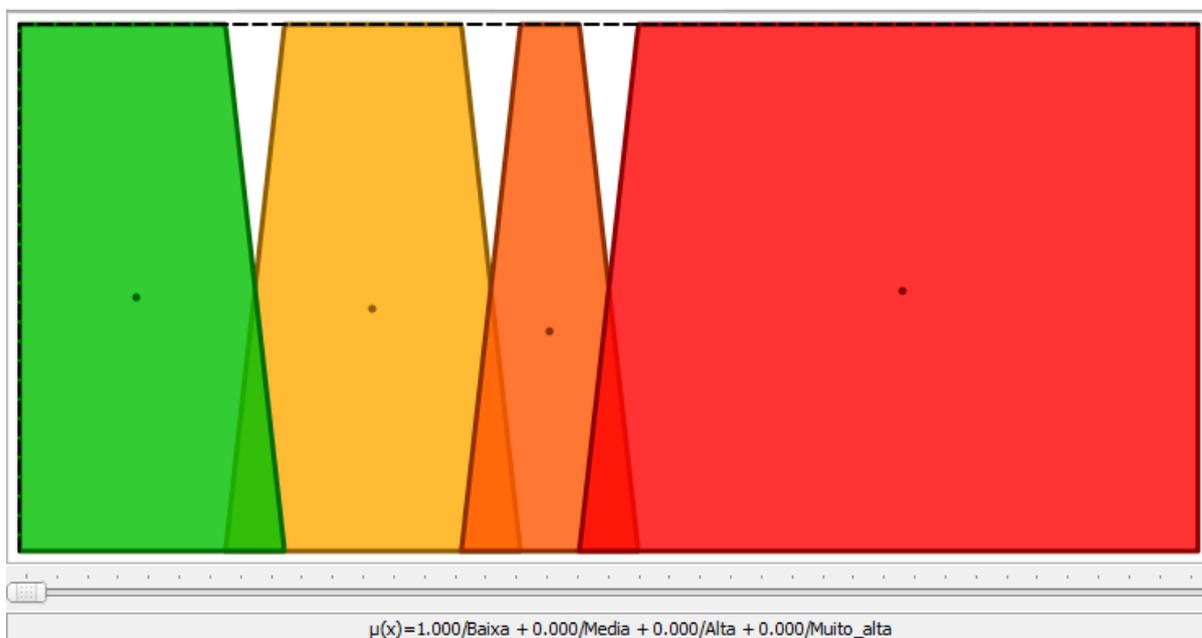


A Figura 10 e a Tabela 7 mostram as referentes ao gás C₂H₄

Tabela 7 – Limites dos trapezóides que representam as variáveis linguísticas do gás C₂H₄

Variável	Limite 1	Limite 2	Limite 3	Limite 4
Baixa	0,00	0,00	17,50	22,50
Média	17,50	22,50	37,50	42,50
Alta	37,50	42,50	47,50	52,50
Muito Alta	47,50	52,50	100,00	100,00

Figura 10 – Funções de Pertinência para o gás C2H4

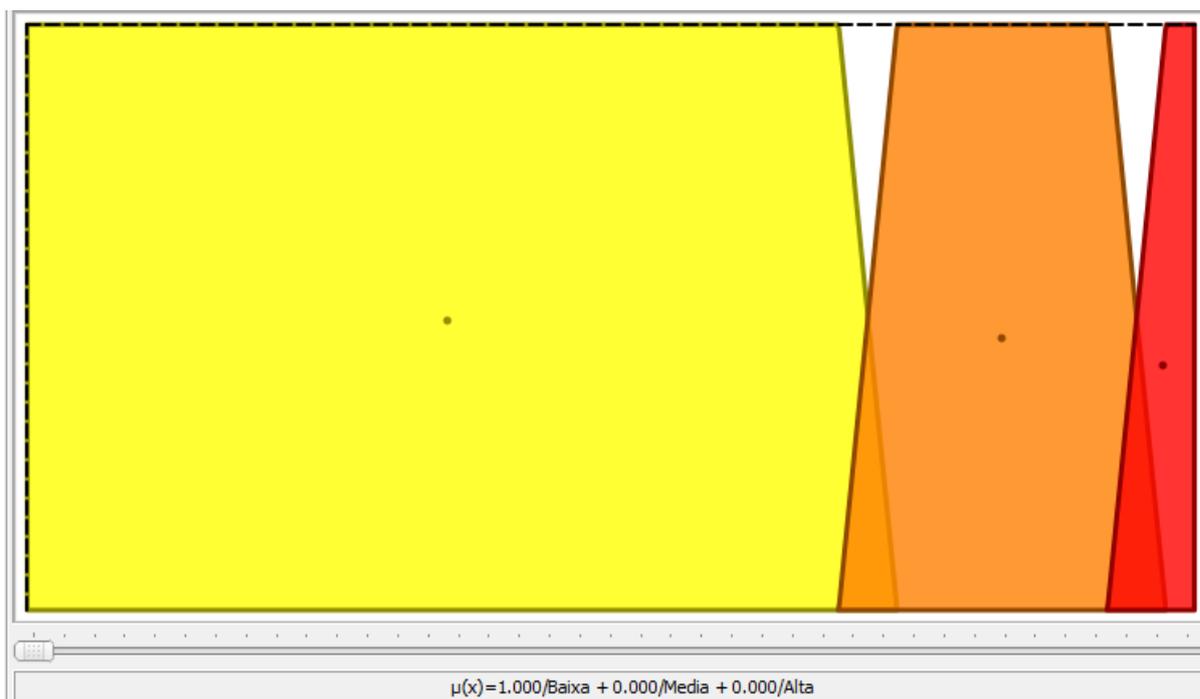


Por último, a Figura 11 e a Tabela 8 mostram os valores para o gás C₂H₂

Tabela 8 – Limites dos trapezóides que representam as variáveis linguísticas do gás C2H2

Variável	Limimte 1	Limite 2	Limite 3	Limite 4
Baixa	0,00	0,00	2,50	7,50
Média	2,50	7,50	7,50	12,50
Alta	7,50	12,50	27,50	32,50
Muito Alta	27,50	32,50	100,00	100,00

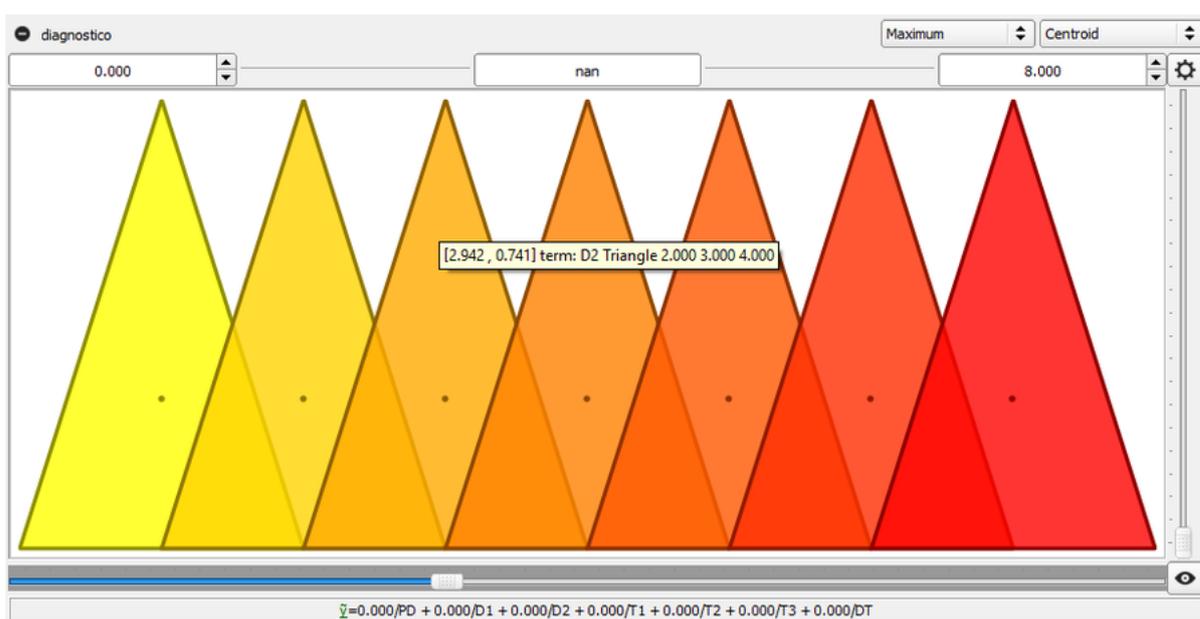
Figura 11 – Funções de Pertinência para o gás C2H2



Para as funções de pertinência dos gases foram utilizadas funções trapezoidais pois refletem mais o pensamento humano, onde temos um período de subida, um período onde se estabiliza e depois a decaída. As funções triangulares, mais simples, também foram utilizadas, porém com um resultado pouco satisfatório.

A Figura 12 demonstra-se as funções de pertinência para a variável de saída, Diagnóstico.

Figura 12 – Funções de Pertinência para a variável de saída Diagnóstico



Para a variável de Diagnóstico(saída), foram mantidas as funções traingulares, pois refletiam bem a saída (7 possíveis diagnósticos) e simplificaram a implementações do modelo. Em testes, as funções trapezoidais foram utilizadas, comprometendo a performance do programa em mais de 60% e amentando em menos de 2% a taxa de acerto.

Foram estabelecidas 17 regras que relacionam as variáveis de entrada à variável de saída de modo a apresentar um comportamento semelhante ao do modelo clássico do Triângulo de Duval. A quantidade de regras é variável e deve ser definida juntamente com o especialista . Quanto melhor definio o conjunto de regras, melhor será o resultado do diagnóstico. Para o nosso problema inicial, as 17 regras foram suficientes para mapear o problema. Abaixo o conjunto de regras criado.

Código 4.1 – Conjunto de regras utilizado na representação do Triângulo de Duval em sistema fuzzy

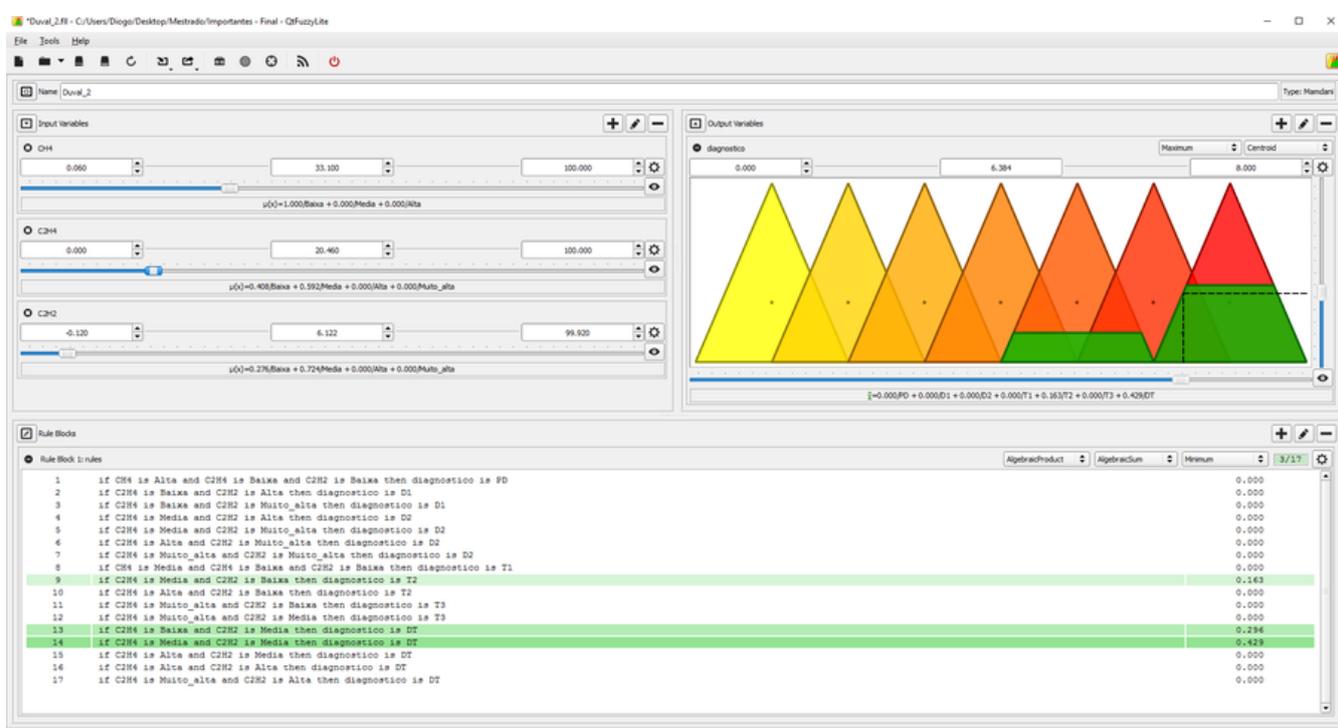
```
01–if CH4 is Alta and C2H4 is Baixa and C2H2 is Baixa then
    diagnostico is PD
02–if C2H4 is Baixa and C2H2 is Alta then diagnostico is D1
03–if C2H4 is Baixa and C2H2 is Muito_alta then diagnostico is
    D1
04–if C2H4 is Media and C2H2 is Alta then diagnostico is D2
05–if C2H4 is Media and C2H2 is Muito_alta then diagnostico is
    D2
06–if C2H4 is Alta and C2H2 is Muito_alta then diagnostico is
    D2
07–if C2H4 is Muito_alta and C2H2 is Muito_alta then
    diagnostico is D2
08–if CH4 is Media and C2H4 is Baixa and C2H2 is Baixa then
    diagnostico is T1
09–if C2H4 is Media and C2H2 is Baixa then diagnostico is T2
10–if C2H4 is Alta and C2H2 is Baixa then diagnostico is T2
11–if C2H4 is Muito_alta and C2H2 is Baixa then diagnostico is
    T3
12–if C2H4 is Muito_alta and C2H2 is Media then diagnostico is
    T3
13–if C2H4 is Baixa and C2H2 is Media then diagnostico is DT
14–if C2H4 is Media and C2H2 is Media then diagnostico is DT
15–if C2H4 is Alta and C2H2 is Media then diagnostico is DT
16–if C2H4 is Alta and C2H2 is Alta then diagnostico is DT
17–if C2H4 is Muito_alta and C2H2 is Alta then diagnostico is
    DT
```

Cada valor numérico das variáveis de entrada é convertido em um valor *fuzzyficado* de acordo com as funções de pertinência apresentadas anteriormente. Em seguida ocorre o processo de inferência, no qual as regras são ativadas a partir das entradas gerando valores *fuzzyficados* da variável de saída. Por último ocorre a *defuzzyficação* da saída, fornecendo o diagnóstico com os graus de pertinência em cada causa da falha no equipamento. A Figura 13 representa um exemplo de

aplicação da metodologia através do software *QTFuzzy Lite*. O software *QTFuzzy* foi utilizado na etapa de testes, posteriormente a lógica *fuzzy* aplicada ao Triângulo de Duval foi codificada em linguagem Java.

Os valores de entrada mostrados na Figura 13 são 71% de CH_4 , 25% de C_2H_4 e 4% de C_2H_2 , fornecendo uma saída 70% de T2 e 30% de D+T, sendo que as regras ativadas foram as de números 9,13 e 14. É possível identificar seus diferentes graus de ativação através da intensidade da cor na Figura 13 em cada regra e através do valor mostrado à direita de cada regra.

Figura 13 – Exemplo de aplicação da metodologia proposta através do software *QTFuzzy Lite* (46)



4.4 Implementação da Lógica Direta

A implementação direta foi feita baseado nas regras do Triângulo de Duval codificadas em linguagem java. Segue o pseudo-código java que foi implementado para mapear o Triângulo de Duval.

Código 4.2 – Código java de implementação do triângulo de Duval

```

3      if (percentualC2H2.compareTo(new BigDecimal("2")) >=
        0 &&
        percentualCH4.compareTo(new
          BigDecimal("98")) >= 0 &&
        percentualC2H4.compareTo(new
          BigDecimal("2")) <= 0
        ) {

```

```
        diagnosticoDuval.append("PD – Descarga
        Parcias");
6      } else if (
            percentualC2H2.compareTo(new
            BigDecimal("13")) >= 0 &&
            percentualC2H2.compareTo(new
            BigDecimal("100")) <= 0 &&
            percentualCH4.compareTo(new
            BigDecimal("87")) <= 0 &&
            percentualC2H4.compareTo(new
            BigDecimal("23")) <= 0
9          ) {
        diagnosticoDuval.append("D1 – Descargas de Baixa
        Energia");
12     } else if (
            percentualC2H2.compareTo(new BigDecimal("4"))
            <= 0 &&
            percentualCH4.compareTo(new BigDecimal("76"))
            >= 0 && percentualCH4.compareTo(new
            BigDecimal("98")) <= 0 &&
            percentualC2H4.compareTo(new BigDecimal("2"))
            >= 0 && percentualC2H4.compareTo(new
            BigDecimal("20")) <= 0
15          ) {
        diagnosticoDuval.append("T1 – Falha Térmica
        (Inferior a 300 C)");
18     } else if (
            percentualC2H2.compareTo(new BigDecimal("4"))
            <= 0 &&
            percentualCH4.compareTo(new BigDecimal("46"))
            >= 0 && percentualCH4.compareTo(new
            BigDecimal("80")) <= 0 &&
            percentualC2H4.compareTo(new BigDecimal("20"))
            >= 0 && percentualC2H4.compareTo(new
            BigDecimal("50")) <= 0
21          ) {
        diagnosticoDuval.append("T2 – Falha Térmica
        (Entre 300 C e 700 C)");
24     } else if (
            percentualC2H2.compareTo(new
            BigDecimal("15")) <= 0 &&
            percentualCH4.compareTo(new
            BigDecimal("50")) <= 0 &&
            percentualC2H4.compareTo(new
            BigDecimal("50")) >= 0
27          ) {
        diagnosticoDuval.append("T3 – Falha Térmica
        (Acima de 700 C)");
30     } else if (
            percentualC2H2.compareTo(new
            BigDecimal("15")) >= 0 &&
            percentualC2H2.compareTo(new
            BigDecimal("29")) <= 0 &&
            percentualCH4.compareTo(new
            BigDecimal("35")) <= 0 &&
            percentualC2H2.compareTo(new
            BigDecimal("38")) >= 0 &&
33          ) {
```

```
        percentualC2H2.compareTo(new
        BigDecimal("85")) <= 0
    ) {
diagnosticoDuval.append("DT – Combina o de
Falha Térmica e Descargas Parciais(INF)")
    ;
36     } else if (
        percentualC2H2.compareTo(new
        BigDecimal("4")) >= 0 &&
        percentualC2H2.compareTo(new
        BigDecimal("29")) <= 0 &&
        percentualCH4.compareTo(new
        BigDecimal("33")) >= 0 &&
        percentualCH4.compareTo(new
        BigDecimal("50")) <= 0 &&
39     percentualC2H4.compareTo(new
        BigDecimal("38")) >= 0 &&
        percentualC2H4.compareTo(new
        BigDecimal("50")) <= 0
    ) {
diagnosticoDuval.append("DT – Combina o de
Falha Térmica e Descargas Parciais(MED)")
    ;
42     } else if (
        percentualC2H2.compareTo(new
        BigDecimal("4")) >= 0 &&
        percentualC2H2.compareTo(new
        BigDecimal("13")) <= 0 &&
        percentualCH4.compareTo(new
        BigDecimal("50")) >= 0 &&
        percentualCH4.compareTo(new
        BigDecimal("98")) <= 0 &&
45     percentualC2H4.compareTo(new
        BigDecimal("0")) >= 0 &&
        percentualC2H4.compareTo(new
        BigDecimal("50")) <= 0
    ) {
diagnosticoDuval.append("DT – Combina o de
Falha Térmica e Descargas Parciais(SUP)")
    ;
48     } else if (
        percentualC2H2.compareTo(new
        BigDecimal("13")) >= 0 &&
        percentualC2H2.compareTo(new
        BigDecimal("77")) <= 0 &&
        percentualCH4.compareTo(new
        BigDecimal("0")) >= 0 &&
        percentualCH4.compareTo(new
        BigDecimal("64")) <= 0 &&
51     percentualC2H4.compareTo(new
        BigDecimal("23")) >= 0 &&
        percentualC2H4.compareTo(new
        BigDecimal("38")) <= 0
    ) {
diagnosticoDuval.append("D2 – Descargas de
Alta Energia");
54     } else if (
```

```
                    percentualC2H2.compareTo(new
                        BigDecimal("29")) >= 0 &&
                        percentualC2H2.compareTo(new
                        BigDecimal("62")) <= 0 &&
                    percentualCH4.compareTo(new
                        BigDecimal("0")) >= 0 &&
                        percentualCH4.compareTo(new
                        BigDecimal("33")) <= 0 &&
57                    percentualC2H4.compareTo(new
                        BigDecimal("38")) >= 0 &&
                        percentualC2H4.compareTo(new
                        BigDecimal("100")) <= 0
                ) {
                    diagnosticoDuval.append("D2 – Descargas de
                        Alta Energia");
60            } else {
                    diagnosticoDuval.append("SD – Sem
                        diagnóstico");
            }
        }
```

As devidas proporções são calculadas de acordo com a norma e após isso feito as comparações em cada intervalo de amostragem do Triângulo de Duval.

4.5 Estudos de Caso

A metodologia proposta foi aplicada a 427 dados de AGD do projeto PID321 da EMC/UFG juntamente com a CELG. Foram coletados em 15 transformadores com diferentes características. As potências elétricas dos equipamentos variam desde 2,5 MVA até 50 MVA e foram amostrados tanto em campo, com os equipamentos em operação, quanto na oficina eletromecânica, nos casos que a falha já havia retirado o equipamento de operação. Nos casos que o transformador já havia sido retirado para manutenção corretiva ou preventiva, a abertura e investigação permitiu identificar a real causa da falha. Esta informação também foi utilizada para validar as indicações obtidas pelas amostragens anteriores à ocorrência da falha, evidenciando a qualidade da abordagem proposta.

A seguir, são apresentados dois estudos de casos dentro do conjunto de transformadores inspecionados aplicando-se os dois métodos citados anteriormente.

4.5.1 Transformador TR01 (25MVA)

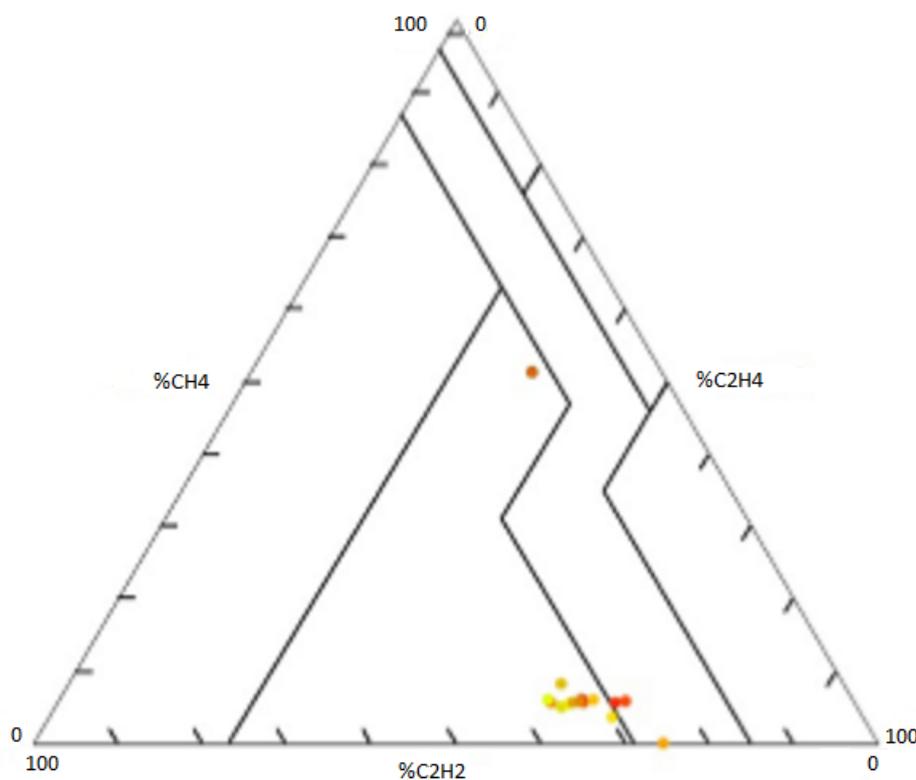
A Tabela 9 mostra as concentrações dos gases chaves identificadas através de cromatografia ao longo de várias amostragens realizadas no equipamento TR01. Este equipamento é um transformador com potência de 25 MVA.

Tabela 9 – Concentração dos gases chave no transformador TR01

Número da Amostra	Data Amostra	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6
15	23/03/2015	250	97	29	63	0
14	10/09/2014	17	2	11	21	0
13	26/02/2014	19	2	12	22	0
12	22/10/2013	21	3	12	21	0
11	29/08/2013	19	2	14	24	0
10	13/03/2013	15	3	18	29	0
09	02/10/2012	35	3	16	31	0
08	09/05/2012	27	3	15	35	0
07	11/11/2011	30	3	14	35	0
06	04/07/2011	26	3	17	33	0
05	03/03/2011	22	3	19	31	0
04	14/10/2010	15	0	14	41	0
03	05/05/2010	16	3	15	31	0
02	05/02/2010	16	2	16	36	0
01	20/10/2009	15	3	19	34	0

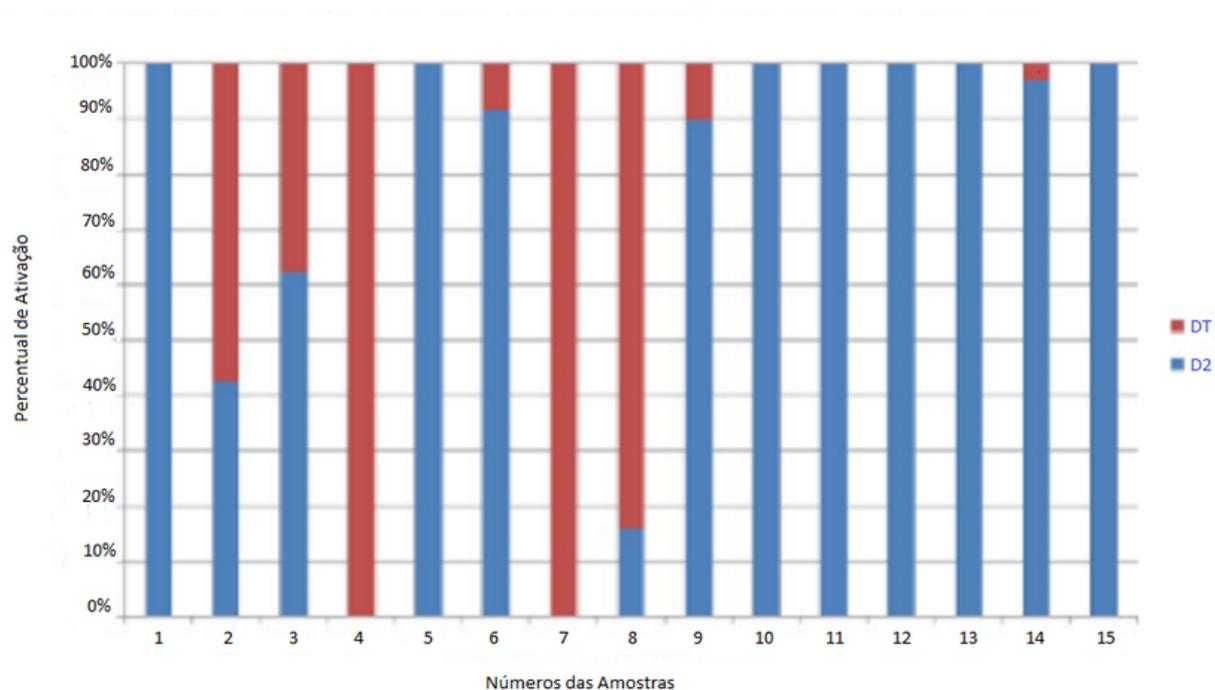
A partir das concentrações dos gases metano, etileno e acetileno pode-se determinar graficamente, no Triângulo de Duval clássico, a evolução dos diagnósticos apresentados. A Figura 14 mostra essa representação gráfica através do Triângulo de Duval clássico. É possível perceber que a maior parte dos diagnósticos está próxima a uma região de transição entre D2 e DT. Na última amostragem o ponto foi deslocado para o centro do triângulo, na região D2, indicando a influência da ocorrência das descargas elétricas por meio do óleo isolante, posteriormente comprovada pela inspeção do equipamento.

Figura 14 – Representação gráfica dos diagnósticos do equipamento TR01 no Triângulo de Duval



A Figura 14 representa a aplicação da metodologia proposta neste trabalho, doravante denominada *Fuzzy-Duval* proposta aos dados da Tabela 9. Através da Fig. \ref{fig412} é possível identificar a contribuição de cada provável causa no diagnóstico do equipamento. Por exemplo, o diagnóstico da amostragem número 8, realizada no dia 09/05/2012, indica que a causa do problema é representada com um grau de pertinência de 16% por D2 (descargas de alta energia) e 84% por DT (falta térmica associada a descargas elétricas). Na amostragem seguinte, realizada 143 dias depois, no dia 02/10/2012, o diagnóstico evoluiu para 90% D2 e 10% DT, permanecendo majoritariamente em D2 até a data da última amostragem, 27/03/2015, quando o equipamento foi retirado de operação para realização de uma manutenção preventiva. Durante a manutenção, verificou-se que a causa do problema estava localizada na lide do enrolamento de alta tensão e caracterizava-se por uma ponte quente em uma região interna a bucha de alta tensão, que evoluiu para a presença de descargas elétricas através do óleo isolante.

Figura 15 – Diagnósticos apresentados pelo método *Fuzzy-Duval* aplicados em dados históricos de amostragem cromatográfica do transformador TR01



Diferentemente do diagnóstico *fuzzy*, a análise direta não traz a ativação de cada intervalo e sim a causa mais provável da falha. Para efeito de comparação, pegaremos apenas duas amostras a 8 e a 9, e será verificado no resultado *fuzzy* o diagnóstico de maior ativação. A entrada de dados para análise da biblioteca de dados pode ser vista na Figura \ref{fig413}.

Código 4.3 – Entrada de dados para análise Direta-Duval

```

ArrayList<HashMap<String, Object>> listaEnsaio = new
    ArrayList<HashMap<String, Object>>();

HashMap<String, Object> ensaioGases = new HashMap<
    String, Object>();
ensaioGases.put("H2", BigDecimal.valueOf("35"));
ensaioGases.put("CH4", BigDecimal.valueOf("3"));
ensaioGases.put("C2H2", BigDecimal.valueOf("16"));
ensaioGases.put("C2H4", BigDecimal.valueOf("31"));
ensaioGases.put("C2H6", BigDecimal.valueOf("0"));
ensaioGases.put("dataEnsaio", new DateTime().withYear(
    2012).withMonthOfYear(10).withDayOfMonth(2));

listaEnsaio.add(ensaioGases);

ensaioGases = new HashMap<String, Object>();
ensaioGases.put("H2", BigDecimal.valueOf("27"));
ensaioGases.put("CH4", BigDecimal.valueOf("3"));
ensaioGases.put("C2H2", BigDecimal.valueOf("15"));
ensaioGases.put("C2H4", BigDecimal.valueOf("35"));
ensaioGases.put("C2H6", BigDecimal.valueOf("0"));

```

```

ensaioGases.put("dataEnsaio", new DateTime().withYear
(2012).withMonthOfYear(10).withDayOfMonth(2));

listaEnsaio.add(ensaioGases);

AnaliseAgd analise = new AnaliseAgd();
JSONObject resultado = analise.
    analisarAmostrasTransformador(ensaio, TipoAnalise.
        Direta, historico);

```

Para o ensaio realizado em 09/05/2012, amostra 08, o resultado com maior ativação é o DT (84%). A análise direta me retorna como diagnóstico uma string como mostrado:

Código 4.4 – Resultado da Análise Direta Utilizando o Triângulo de Duval para o Transformador TR01

```

Resultado : {"09/05/2012": {"DUVAL": "DT –
    COMBINA O DE FALHA T RMICA E DESCARGAR
    PARCIAIS(INF) "}}
    {"02/10/2012": {"DUVAL": "DESCARGAS DE
        ALTA ENERGIA"}

```

Ou seja, para o ensaio de 09/05/2012, amostra 08, teremos uma provável DT e para 02/10/2012, amostra 09, D2. Ambos os métodos retornaram a mesma resposta para as duas amostras testadas.

4.5.2 Transformador TR02 (33,25MVA)

A Tabela 10 mostra as concentrações dos gases chave identificadas através de cromatográfica ao longo de várias amostragens realizadas no equipamento TR02. Este equipamento é um transformador com potência de 33,25 MVA.

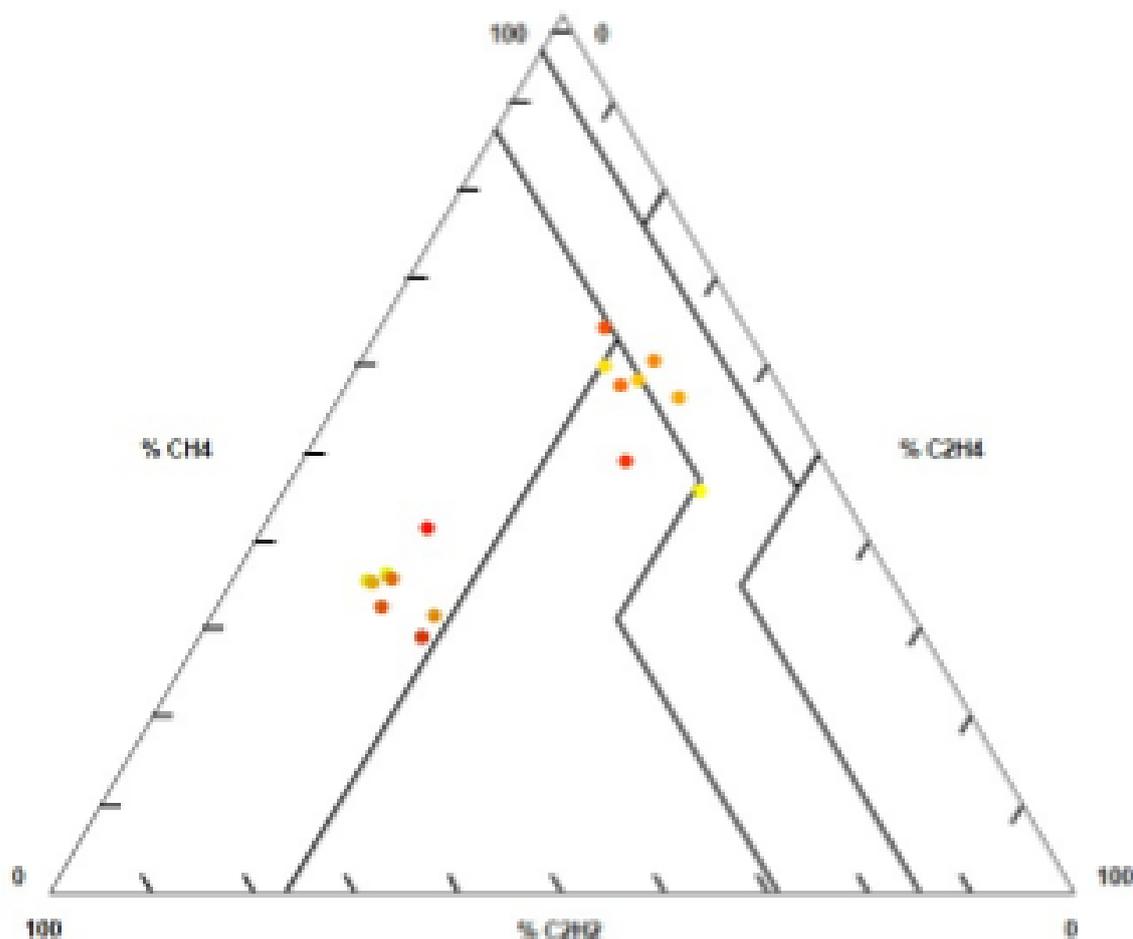
Tabela 10 – Concentração dos gases chave no transformador TR02

Número da Amostra	Data Amostra	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6
17	19/09/2014	209	45	76	34	10
16	25/08/2014	106	36	57	18	10
15	24/06/2014	129	41	56	18	11
14	23/05/2014	140	42	62	29	12
13	24/04/2014	142	50	72	20	12

Número da Amostra	Data Amostra	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6
12	27/03/2014	132	45	61	19	11
11	20/02/2014	144	48	69	18	11
10	12/02/2014	143	46	62	20	13
09	10/02/2014	92	46	47	18	11
08	15/08/2013	46	31	12	20	13
07	26/02/2013	33	38	87	13	12
06	04/09/2012	39	30	8	14	11
05	29/03/2012	47	40	7	19	14
04	07/11/2011	29	27	5	16	11
03	27/06/2011	34	35	8	17	15
02	15/02/2011	36	42	11	17	20
01	05/10/2010	56	37	11	33	15

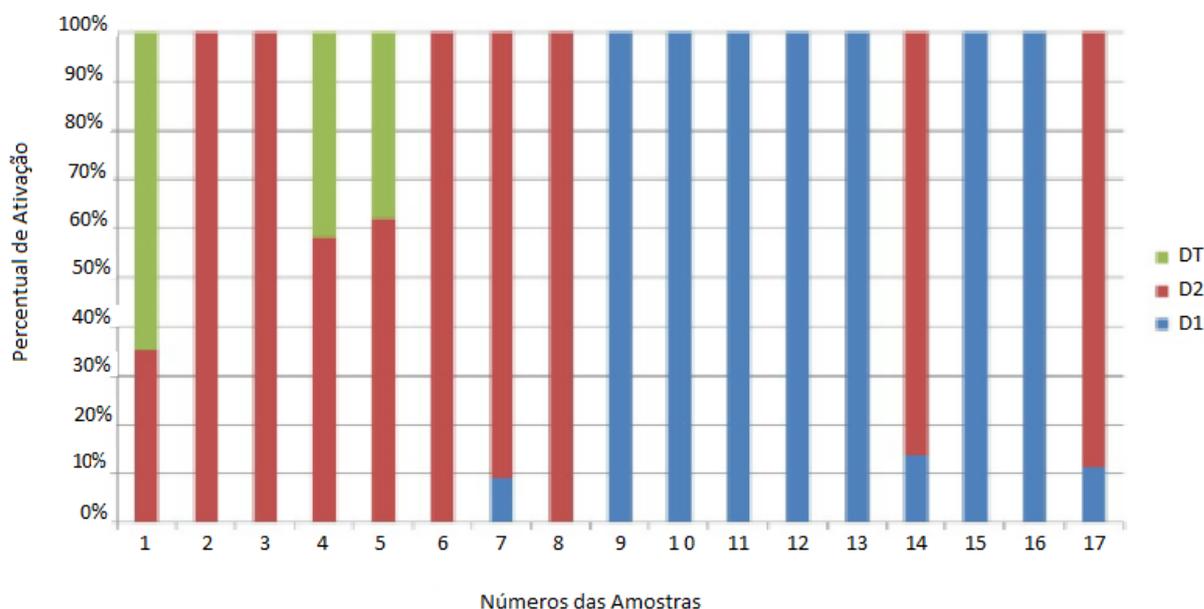
A Figura 16 mostra a representação gráfica através do Triângulo de Duval clássico dos diagnósticos obtidos pelo método *Fuzzy-Duval* proposto. É possível perceber que inicialmente os diagnósticos estavam concentrados na região de transição entre D1, D2 e DT. Nos diagnósticos referentes às amostragens mais recentes, formou-se um novo agrupamento na região de D1, indicando a presença de um elevado número de descargas elétricas no equipamento.

Figura 16 – Representação gráfica dos diagnósticos do equipamento TR02 no Triângulo de Duval



A Figura 17 representa a aplicação da metodologia *Fuzzy-Duval*. Através da Figura 17 é possível identificar a contribuição de cada provável causa no diagnóstico do equipamento. Neste equipamento é possível perceber a evolução do diagnóstico de faltas térmicas, DT, para a presença de descargas elétricas tanto de baixa energia, D1, quanto de alta energia, D2. A aplicação do método *Fuzzy-Duval* proposto às cinco primeiras amostras indica a presença de descargas de alta energia associadas a faltas térmicas. As demais amostras indicam a mistura de descargas elétricas de baixa e alta energia no interior do transformador. Após a retirada de operação do transformador TR02 para a realização de uma manutenção devido ao aumento da taxa de crescimento dos gases, identificou-se que a real causa do problema foi caracterizada por descargas de equipotencialização do aterramento do núcleo e grande número de descargas parciais na parte ativa devido à formação de borra no corpo do equipamento. A geração desta borra pode ser associada ao aumento de temperatura da celulose indicada nos primeiros diagnósticos da metodologia proposta.

Figura 17 – Diagnósticos apresentados pelo método *Fuzzy-Duval* aplicados em dados históricos de amostragem cromatográfica do transformador TR02



Para efeito de comparação, pegaremos apenas três amostras a 1,7 e 9, e será verificado no resultado fuzzy o diagnóstico de maior ativação. A entrada de dados para análise da biblioteca de dados pode ser vista a seguir.

Código 4.5 – Entrada de dados para análise Direta-Duval para o transformador TR2

```

ArrayList<HashMap<String , Object>> listaEnsaio = new
    ArrayList<HashMap<String , Object>>();

HashMap<String , Object> ensaioGases = new HashMap<
    String , Object>();
ensaioGases.put("H2", BigDecimal.valueOf("56"));
ensaioGases.put("CH4", BigDecimal.valueOf("37"));
ensaioGases.put("C2H2", BigDecimal.valueOf("11"));
ensaioGases.put("C2H4", BigDecimal.valueOf("33"));
ensaioGases.put("C2H6", BigDecimal.valueOf("15"));
ensaioGases.put("dataEnsaio", new DateTime().withYear
    (2010).withMonthOfYear(10).withDayOfMonth(5).
    toDate());

listaEnsaio.add(ensaioGases);

ensaioGases = new HashMap<String , Object>();
ensaioGases.put("H2", BigDecimal.valueOf("33"));
ensaioGases.put("CH4", BigDecimal.valueOf("38"));
ensaioGases.put("C2H2", BigDecimal.valueOf("8"));
ensaioGases.put("C2H4", BigDecimal.valueOf("13"));
ensaioGases.put("C2H6", BigDecimal.valueOf("12"));
ensaioGases.put("dataEnsaio", new DateTime().withYear
    (2013).withMonthOfYear(2).withDayOfMonth(26).

```

```

        toDate ( ) ;

        listaEnsaio .add(ensaioGases ) ;

        ensaioGases = new HashMap<String , Object >( ) ;
        ensaioGases .put ( "H2" , BigDecimal .valueOf ( "92" ) ) ;
        ensaioGases .put ( "CH4" , BigDecimal .valueOf ( "46" ) ) ;
        ensaioGases .put ( "C2H2" , BigDecimal .valueOf ( "47" ) ) ;
        ensaioGases .put ( "C2H4" , BigDecimal .valueOf ( "18" ) ) ;
        ensaioGases .put ( "C2H6" , BigDecimal .valueOf ( "11" ) ) ;
        ensaioGases .put ( "dataEnsaio" , new DateTime ( ) .withYear
            (2014) .withMonthOfYear (2) .withDayOfMonth (10) .
            toDate ( ) ) ;

        listaEnsaio .add(ensaioGases ) ;

        AnaliseAgd analise = new AnaliseAgd ( ) ;
        JSONObject resultado = analise .
            analisarAmostrasTransformador (ensaio , TipoAnalise .
                Direta , historico ) ;

```

A análise *Fuzzy-Duval* retorna como diagnóstico de maior ativação para os ensaios 1,7 e 9 , DT, D2 e D1 respectivamente. Para a análise direta segue o resultado:

Código 4.6 – Resultado da Análise Direta Utilizando o Triângulo de Duval para o Transformador TR01

```

Resultado : { "10/02/2014" : { "DUVAL" : "D1 – DESCARGAS
DE BAIXA ENERGIA" } }
            { "26/02/2013" : { "DUVAL" : "D1 – DESCARGAS
DE BAIXA ENERGIA" } }
            { "05/10/2010" : { "DUVAL" : "DT –
COMBINA O DE FALHA T RMICA E
DESCARGAR PARCIAIS (MED) " } }

```

Para este transformador os métodos retornaram resultados diferentes. Assim sendo, devem ser avaliados novamente por um especialista para verificar o real estado deste transformador.

A fonte deste trabalho é uma planilha gerado pelo projeto P&D 321; em campo com transformadores reais, em uma parceria com a CELG D Distribuição. Nesta planilha estavam incluídos dados de cerca de 9 transformdaores. Ensaio feitos e catalogados por data com a respectiva medição de cada gás. Também continha resultados de vários ensaios que foram comparados com os resultados gerados por esta solução.

A metodologia apresentada neste trabalho foi aplicada aos nove transformadores. Em 6 casos os diagnósticos obtidos por ambos os métodos apresentados (*Fuzzy* e *Duval*) coincidiram com o resultado obtido pelo especialista em campo. Um caso onde nenhum dos métodos obteve o resultado igual e dois casos obtivemos um acerto parcial onde um dos métodos chegou ao mesmo resultado do especialista. Sendo assim, considerando o cenário obtido, a taxa de acerto do sistema desenvolvido foi de

78% e pode ser replicado para uma base bem maior de ensaios.

5 Conclusão

As técnicas de monitoramento e identificação de falhas incipientes em transformadores ganharam novos impulsos, no que se refere ao seu desenvolvimento. A metodologia do Triângulo de Duval é uma das mais utilizadas atualmente devido à precisão e confiabilidade de seus diagnósticos. No entanto para um planejamento eficiente da manutenção de transformadores de potência no setor elétrico, fazem-se necessárias mais informações, principalmente relacionadas à evolução das condições operativas dos equipamentos.

Neste trabalho, foi realizado o desenvolvimento de uma biblioteca de análise de transformadores utilizando uma metodologia *fuzzy* aplicada ao Triângulo de Duval para diagnóstico de transformadores de potência por meio de análise de gases dissolvidos. Por meio da utilização da linguagem de programação JAVA , pôde-se criar um sistema para execução de sistemas especialistas independente do *software* Matlab.

O sistema especialista é de fácil uso, com entradas facilitadas, de fácil entendimento. As amostras são digitadas, assim que coletadas em campo, e a partir daí o sistema especialista se encarrega do restante. Por ser um sistema de código aberto, pode ser utilizado em qualquer sistema computacional e aproveitado como uma biblioteca de apoio para o desenvolvimento de interfaces mais aprimoradas.

Este sistema especialista provê informações evolutivas de diagnóstico de qualquer transformador de potência baseado na leitura dos gases, realizado em campo por um especialista, colaborando com a melhora na confiabilidade do sistema como um todo. Em testes realizados durante o desenvolvimento deste trabalho, em dados reais de transformadores em uso, o sistema se mostrou bastante eficaz em seus diagnósticos, com 78% de acerto. Portanto, objetivo principal do trabalho foi atingido com a constatação de que a metodologia proposta para implementar o monitoramento qualitativo de transformadores foi capaz de efetuar corretamente o mapeamento dos valores das medidas supervisionadas em estados operativos esperados e de caracterizar adequadamente a tendência operativa em qualquer período de análise.

Referências

- 1 MENDEL, J. M. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, v. 83, n. 3, p. 345 – 377, 1995.
- 2 TRANSFORMADOR, A. *Especificação de Potência*. [S.l.].
- 3 BENGTTSSON, C. Status and trends in transformer monitoring. *IEEE Transactions on Power delivery*, v. 11, n. 3, p. 1379 – 1384, 1996.
- 4 KOVACEVIC. Transformer life extension by continuous online oil conditioning. In: *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*. [S.l.]: IEEE, 2003. p. 271 – 275.
- 5 MORAIS, D. R. Ferramenta inteligente para detecção de falhas incipientes em transformadores baseada na análise de gases dissolvidos no óleo isolante. 2004.
- 6 HAN, Y.; SONG, Y. Condition monitoring techniques for electrical equipment-a literature survey. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, p. 4 – 13, 01 2003.
- 7 COMMITTEE, T. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil Immersed Transformers. *Institute of Electrical & Electronics Engineers, Inc.*, 1992.
- 8 COMMISSION, I. E. Mineral oil-impregnated electrical equipment in service-guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis. *International Standard IEC*, v. 60599, 2007.
- 9 FREITAS, A. Redes Neurais Artificiais Aplicadas em Transformadores de Distribuição Imersos em Óleo. *Redes Neurais Artificiais Aplicadas em Transformadores de Distribuição Imersos em Óleo*, 2000.
- 10 WHITE, D. A.; SOFGE, D. A. *Handbook of Intelligent Control: Neural, Fuzzy, and Adaptive Approaches*. [S.l.]: Van Nostrand Reinhold, 1992. ISBN 0442308574.
- 11 HEATHCOTE, M. *J & P transformer book*. 1. ed. [S.l.]: Newnes, 2011.
- 12 BECHARA, R. *Análise de falhas de transformadores de potência*. 2010. 102 p. Dissertação (Engenharia Elétrica) — Escola Politécnica.
- 13 MARQUES, A. P. et al. A Mathematical Contribution to the Analysis of Moisture Migration in Power Transformer Oil-Paper Insulation Systems . In: SYMPOSIUM, I. 10th I. (Ed.). *Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*. [S.l.], 2015. p. 1 – 6.
- 14 BARTLEY, W. H. Analysis of transformer failures. *International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference*, p. 1 – 5, 2003.
- 15 FERREIRA, D. A. P. *Análise de falhas em transformadores de distribuição por metodologia forense*. 2013. 118 p. Dissertação (Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos.

- 16 ASSUNÇÃO, T. C. B. N. *Contribuição a Modelagem e Análise do Envelhecimento de Transformadores de Potência*. 2007. 129 p. Tese (Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- 17 MILASCH, M. *Manutenção de transformadores em líquido isolante*. 1. ed. [S.l.]: Edgard Blucher, 1984. ISBN 9788521201403.
- 18 ROUSE, T. O. Mineral insulating oil in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 14, n. 3, p. 6 – 16, 1998.
- 19 ZIRBES, R.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estados de Isolamento de Papel Impregnado com Óleo Mineral. *Sba Controle & Automação*, v. 16, n. 3, p. 318 – 331, 09 2005.
- 20 SCHMIDT, W. *Materiais Elétricos*. 1. ed. [S.l.]: Edgard Blucher.
- 21 PINTO, A. K.; NASCIF, J.; BARONI, T. *Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas*. [S.l.]: Qualitymark, 2002. ISBN 8573033800.
- 22 SWANSON, L. An information-processing model of maintenance management. *International Journal of Production Economics*, v. 83, n. 1, p. 45 – 64, 2003.
- 23 VIANA, H. *PCM, planejamento e controle da manutenção*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2008.
- 24 PINTELON, L.; PINJALA, S. K.; VEREECKE, A. Evaluating the effectiveness of maintenance strategies. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 12, p. 7 – 20, 1995.
- 25 SOUZA, J. B. de. *Alinhamento das estratégias do planejamento e controle da manutenção (PCM) com as finalidades e funções do planejamento e controle da produção (PCP): uma abordagem analítica*. 2008. 167 p. Dissertação (Engenharia de Produção) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- 26 WANG, M.; VANDERMAAR, A.; SRIVASTAVA, K. Review of condition assessment of power transformers in service. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 18, n. 6, p. 12 – 25, 12 2002.
- 27 CARNERO, M. An evaluation system of the setting up of predictive maintenance programmes. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 91, n. 8, p. 945 – 963, 2006.
- 28 JR., C. L. N.; YONEYAMA, T. *Inteligência artificial em controle e automação*. 1. ed. [S.l.]: Edgard Blucher, 2000. ISBN 8521203101.
- 29 MENDES, R. D. Inteligência artificial: sistemas especialistas no gerenciamento da informação. *Ciência da Informação* 26.1, v. 26, n. 1, 1997.
- 30 GRAHAM-JONES, P.; MELLOR, B. Expert and knowledge-based systems in failure analysis. *Engineering Failure Analysis*, v. 2, n. 2, p. 137 – 149, 06 1995.
- 31 REZENDE, S. O. *Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações*. [S.l.]: Editora Manole Ltda, 2003.

- 32 LEVCHIK, S. et al. Depolymerization processes in the thermal degradation of cellulosic paper insulation in electrical transformers. *Polymer Degradation and Stability*, v. 61, n. 3, p. 507 – 211, 1998.
- 33 HAUPERT, T.; JAKOB, F. A review of the operating principles and practice of dissolved gas analysis. *Electrical Insulating Oils*, 1988.
- 34 C57.104-2008, I. S. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers. *IEEE Standard C57.104-2008*, 9 2008.
- 35 SIMOES, M. G.; SHAW, I. S. *Controle e modelagem fuzzy*. 1. ed. [S.l.]: Blucher, 2007.
- 36 SANDRI, S.; CORREA, C. Lógica nebulosa. *V Escola de Redes Neurais*, v. 1, n. 1, p. 73 – 90, 1999.
- 37 BITTENCOURT, J. R.; OSÓRIO, F. FuzzyF—Fuzzy Logic Framework: Uma Solução Software Livre para o Desenvolvimento, Ensino e Pesquisa de Aplicações de Inteligência Artificial Multiplataforma. *WSL 2002*, 2002.
- 38 NASSAR, S. M. *Métodos de Desfuzzificação*. 2017. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~silvia/disciplinas/sed/aulas/MÉTODOSDEDESFUZZIFICAÇ~AO.doc>>. Acesso em: 19/03/2017.
- 39 TANSCHKEIT, R. Sistemas fuzzy. *DEE-PUC-Rio*, v. 1, n. 1, 2004.
- 40 GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. *SBA Controle & Automação 4.3*, v. 1, n. 1, p. 97 – 115, 1994.
- 41 PEDRYCZ, W. *Fuzzy control and fuzzy systems*. 2. ed. [S.l.]: 2nd. Research Studies Press Ltd, 1993.
- 42 GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R.; GOMIDE, F. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. *Proc. 6 th IFSA Congress-Tutorials*, p. 1 – 38, 1995.
- 43 LEE, C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics 20.2*, p. 404 – 418, 1990.
- 44 MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, v. 7, n. 1, p. 1 – 13, 1975.
- 45 SUGENO, M.; TANAKA, K. Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy sets and systems*, v. 45, n. 2, p. 135 – 156, 1992.
- 46 RADA-VILELA, J. *QtFuzzyLite*. [S.l.], 2010.
- 47 KELLY, J. J. Transformer fault diagnosis by dissolved-gas analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, n. 6, p. 777 – 782, 1982.
- 48 SUGANYABHARATHI, M. et al. Interpretation of dissolved gas analysis in transformer oil using fuzzy logic system. *Power, Energy and Control (ICPEC), 2013 International Conference*, p. 245 – 249, 02 2013.
- 49 RADA-VILELA, J. *QtFuzzyLite*. [S.l.], 2010.