

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ SIQUEIRA CAMPOS FILHO

**MÉTODO DO TRIÂNGULO DE DUVAL PARA ANÁLISE DOS ÓLEOS
ISOLANTES SILICONE E ÉSTER NATURAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

JOSÉ SIQUEIRA CAMPOS FILHO

**MÉTODO DO TRIÂNGULO DE DUVAL PARA ANÁLISE DOS ÓLEOS
ISOLANTES SILICONE E ÉSTER NATURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientador: Prof. Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio.

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

José Siqueira Campos Filho

Método do triângulo de duval para análise dos óleos isolantes de silicone e éster natural

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:00hs do dia 08/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Wagner Endo - (Membro)

Prof(a). Esp. José Roberto Shimazaki - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por cada oportunidade, pelos aprendizados durante a caminhada e por minha família.

Aos meus pais Leda e José, meus irmãos Carla e Alan, meu padrinho Luís e minha cunhada Marilene pelo apoio e incentivo de diversas formas, tanto financeiro quanto psicológico. Sem eles o meu sonho de cursar Engenharia Elétrica e minha jornada seriam infinitamente mais difíceis.

Ao professor Me. Marco Antonio Finocchio, meus sinceros agradecimentos pela orientação neste trabalho, que com paciência e dedicação contribuiu imensamente em minha formação como engenheiro.

Aos professores José Roberto Shimazaki e Wagner Endo pelas valiosas sugestões e comentários que colaboraram com o aprimoramento deste trabalho.

Ao engenheiro eletricista Thales Mendes por sua paciência e colaboração na realização deste trabalho. Aos amigos Bruno Fonseca e Heloiza Paulichen por dedicarem seu tempo compartilhando conhecimento e colaborando com o trabalho.

Em reta final da graduação, deixo aqui meus agradecimentos a todos os professores que contribuíram em minha formação.

Aos amigos Paulo Italo Stachuk, Lucas de Oliveira, Paulo Ricardo e Júlio Frauzino agradeço pelo companheirismo e convivência em nossa república. Aos amigos André Anhaia, Bruno Silva, Carlos Slow, Caio Gerwandsnajder, Júlio Buzanelli, Luiz Yamashita, Mayara Delanhese, Rafael Nascimento, Renan Ferreira, Rinaldo Rondina, Laryssa Urata e Marila Aguiar os quais tive o prazer de conviver nesse período de graduação. E ao amigo de longa data Marco Pederzini, pelo companheirismo de sempre.

Por fim agradeço a minha namorada Caroline Sorensen pelo apoio incondicional e inspiração nessa última etapa da graduação.

RESUMO

CAMPOS FILHO, José Siqueira. **Método do triângulo de Duval para análise dos óleos isolantes silicone e éster natural**. 2017. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Este trabalho apresenta um estudo e aplicação do método do Triângulo de Duval para fluidos isolantes alternativos. Desenvolveu-se uma ferramenta para o diagnóstico de falhas incipientes. Apresenta-se uma revisão bibliográfica referente ao óleo silicone e éster natural como dielétricos utilizados em transformadores. Discutiu-se a análise de gases dissolvidos em óleo isolante. Foram realizadas simulações tendo como base de dados resultados e estudos de artigos pertinentes. Os resultados são também comparados com aplicativo para análise de óleo mineral. O desempenho do aplicativo é avaliado através da identificação de falhas previamente verificadas em transformadores.

Palavras-chave: Éster natural. Óleo silicone. Método de Duval. Falhas incipientes. Transformadores elétricos.

ABSTRACT

CAMPOS FILHO, José Siqueira. **The Duval Triangle Method for Silicone Oil and Natural Ester Analysis**. 2017. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

This work presents a study and application of the Duval Method for alternative insulation fluids. A tool for incipient faults diagnosis is developed. The properties of silicone oil and natural ester as dielectric fluids for electric transformers are discussed. In addition, the gas-in-oil analysis is discussed. Studies found in related papers are used as database for the simulation in this work. The results are compared to the application for mineral oil analysis. The performance of the tool is tested by comparison with previously detected faults in transformers.

Keywords: Natural ester. Silicone oil. Duval Method. Incipient faults. Electrical transformer.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Propriedades do fluido isolante silicone comparado ao OMI.....	21
Tabela 2	– Propriedades dos ésteres naturais isolantes	22
Tabela 3	– Gases dissolvidos nos fluidos isolantes BIOTEMP®, Envirotemp FR3® e silicone.....	27
Tabela 4	– Comparação entre os métodos de DGA.....	28
Tabela 5	– Codificação das falhas do Triângulo de Duval.....	31
Tabela 6	– Comparação da formação de gases em análise presentes em OM E não-mineral	33
Tabela 7	– Alterações nas fronteiras das zonas de falhas para óleo isolante não-mineral comparadas com OMI.....	34
Tabela 8	– Codificação das falhas do FR3® baixas temperaturas.....	36
Tabela 9	– Limites para aplicação do método de Duval.....	37
Tabela 10	– Resultados da análise para óleo silicone.....	47
Tabela 11	– Resultados da análise para éster FR3®.....	50
Tabela 12	– Resultados da análise para falhas de baixa temperatura FR3®.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	– Sistema esquemático de distribuição.....	16
Figura 02	– Transformador de distribuição para instalação em poste.....	18
Figura 03	– Transformador de Potência.....	18
Figura 04	– Representação gráfica do Triângulo de Duval para OMI.....	32
Figura 5(a)	– Triângulo de Duval tradicional.....	34
Figura 5(b)	– Triângulo de Duval para Óleo Silicone.....	34
Figura 6(a)	– Triângulo de Duval tradicional.....	35
Figura 6(b)	– Triângulo de Duval adaptado éster FR3®	35
Figura 7(a)	– Triângulo de Duval tradicional	35
Figura 7(b)	– Triângulo de Duval adaptado éster BIOTEMP®	35
Figura 08	– Triângulo para falhas de baixa temperatura em éster FR3®.....	36
Figura 9(a)	– Interface desenvolvida em ambiente MATLAB para análise de gases dissolvidos	38
Figura 9(b)	– Seleção do isolante, entrada de dados e resultado no aplicativo.....	38
Figura 9(c)	– Percentual de gases metano, etileno e acetileno presentes na amostra....	39
Figura 10	– Fluxograma que representa a lógica da análise de gases.....	40
Figura 11	– Obtenção das coordenadas cartesianas R_x e R_y para um ponto no triângulo.....	41
Figura 12(a)	– Delimitação de zonas para óleo Silicone.....	42
Figura 12(b)	– Delimitação de zonas para éster FR3®.....	42
Figura 12(c)	– Delimitação de zonas para éster BIOTEMP®.....	42
Figura 12(d)	– Delimitação de zonas para éster FR3® baixa temperatura.....	42
Figura 13(a)	– Divisão das regiões D2 e DT óleo silicone.....	44
Figura 13(b)	– Divisão das regiões D2 e DT éster FR3®	44
Figura 13(c)	– Divisão das regiões D2 e DT éster BIOTEMP®.....	44
Figura 13(d)	– Divisão das regiões S, PD e ND éster FR3®	44
Figura 14(a)	– Fluxograma lógica para localização de falhas óleo silicone.....	45
Figura 14(b)	– Fluxograma lógica para localização de falhas para éster BIOTEMP®	45
Figura 14(c)	– Fluxograma lógica para localização de falhas para éster FR3®	45

Figura 14(d) – Fluxograma lógica para localização de falhas de baixa temperatura FR3	45
Figura 15(a) – Teste A: Identificação da falha T1 manualmente.....	48
Figura 15(b) – Teste A: Identificação da falha T1 através da simulação.....	48
Figura 16(a) – Teste B: Identificação da falha T2 manualmente.....	48
Figura 16(b) – Teste B: Identificação da falha T2 através da simulação.....	49
Figura 17(a) – Teste C: Identificação da falha D2 manualmente.....	49
Figura 17(b) – Teste C: Identificação da falha D2 através da simulação.....	49
Figura 18 – Teste D: Identificação da falha D1 através da simulação.....	50
Figura 19 – Teste E: Identificação da falha T1 através da simulação.....	51
Figura 20 – Teste F: Identificação da falha T2 através da simulação.....	51
Figura 21(a) – Resultado obtido através da simulação para Teste G.....	52
Figura 21(b) – Resultado obtido através da simulação para Teste H.....	53
Figura 21(c) – Resultado obtido através da simulação para Teste I.....	53
Figura 22(a) – Teste F: Identificação da falha D2 manualmente.....	54
Figura 22(b) – Teste F: Identificação da falha D2 através da simulação.....	54
Figura 23(a) – Teste G: Identificação da falha T1 manualmente.....	55
Figura 23(b) – Teste G: Identificação da falha T1 através da simulação.....	55
Figura 24(a) – Teste H: Identificação da falha T3 manualmente.....	56
Figura 24(b) – Teste H: Identificação da falha T3 através da simulação.....	56
Figura 25 – Identificação da falha T3 para óleo mineral.....	56

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C	Falha térmica ($T > 300^{\circ}\text{C}$) para FR3
C₂H₂	Acetileno
C₂H₄	Etileno
C₂H₆	Etano
CH₄	Metano
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Electriques</i>
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
D1	Descargas de baixa energia
D2	Descargas de alta energia
DGA	<i>Dissolved gas analysis</i>
DT	Mistura de falhas
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
H₂	Hidrogênio
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
NBR	Norma Brasileira ABNT
ND	Não determinado
O	Sobreaquecimento
OMI	Óleo mineral isolante
OS	Óleo silicone
OVI	Óleo vegetal isolante
PD	Descargas parciais
ppm	Partes por milhão
S	<i>Stray Gassing</i>
T1	Falha térmica ($T < 300^{\circ}\text{C}$)
T2	Falha térmica ($300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.3	Objetivos específicos.....	15
1.3	ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	INTRODUÇÃO A TRANSFORMADORES ELÉTRICOS.....	16
2.1.1	Tipos de transformadores.....	17
2.1.1	Princípios construtivos.....	19
2.1.3	Materiais isolantes.....	19
2.2	ÓLEOS ISOLANTES.....	20
2.2.1	Óleo Silicone.....	20
2.2.2	Éster Natural.....	21
3	ESTUDO DE FALHAS E MANUTENÇÃO EM TRANSFORMADORES	24
3.1	FALHAS NOS TRANSFORADORES ELÉTRICOS.....	24
3.1.1	Falhas Térmicas	25
3.1.2	Falhas Elétricas.....	26
3.2	TEORIA DE FORMAÇÃO DE GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO ISOLANTE.....	26
3.3	ANÁLISE DOS GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO ISOLANTE	28
4	APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DO TRIÂNGULO DE DUVAL ADAPTADO.....	30
4.1	MÉTODO DO TRIÂNGULO DE DUVAL PARA DGA.....	30
4.1.1	Triângulo de Duval tradicional	30
4.1.2	Triângulo de Duval adaptado	33
4.1	DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS.....	37
4.2.1	Construção do Triângulo e Delimitação das Regiões de Falhas	40
4.2.2	Localização da Falha no Triângulo	43

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
5.1	RESULTADOS PARA ÓLEO SILICONE.....	47
5.2	RESULTADOS PARA ÉSTER FR3®.....	49
5.3	RESULTADOS PARA ÉSTER BIOTEMP®.....	53
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....	57
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	57
	REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

A invenção do transformador de potência no final do século XIX tornou possível o desenvolvimento do sistema de abastecimento de energia elétrica através da transmissão em corrente alternada. Ao passo que as tensões de transmissão são aumentadas em partes do sistema elétrico, transformadores tem papel fundamental na conexão de sistemas em níveis diferentes de tensão, constituindo assim conexão vital entre a geração de energia elétrica e os pontos de utilização (KULKARNI,2004)

O transformador é uma máquina estática que baseia o seu funcionamento na indução magnética. Este aparelho destina-se elevar ou baixar o valor de uma tensão ou de uma corrente (ALVES, 2003).

Ainda hoje, a maioria dos transformadores e outros equipamentos elétricos utilizam óleo isolante do tipo mineral (OMI). Óleos não-minerais como o óleo vegetal isolante (ésteres OVI), ésteres sintéticos e óleo silicone, entretanto, são cada vez mais utilizados para aplicações que óleos não inflamáveis ou mais biodegradáveis são desejados. Em aplicações onde o transformador é instalado em locais fechados, áreas urbanas ou transformadores em ferrovias são exemplos que se torna interessante o uso de equipamentos preenchidos com óleo isolante não-mineral. (DUVAL, 2010).

Com a crescente preocupação ambiental, a performance do equipamento passa a não ser o único critério levado em conta para seleção de um material, mas também o impacto ambiental que o produto irá causar no meio inserido. O uso de líquido dielétricos que atendam requisitos mínimos de saúde e oferece menos riscos ao ambiente torna-se então importante (MCSHANE, 1999).

O uso de ésteres naturais como isolantes em transformadores é uma pratica relativamente recente. O óleo mineral é classificado como perigoso para o meio ambiente, pois cuidados devem ser tomados quanto à possíveis vazamentos e no descarte deste produto. Nestas condições os ésteres naturais se tornam uma alternativa devido a menor risco oferecido ao ambiente sendo mais biodegradáveis. O óleo vegetal tem ainda como vantagem em relação ao tradicional óleo mineral um elevado ponto de combustão (TENBOHLEN, 2010).

O uso do óleo silicone é uma prática recente. Este material é mais comumente utilizado em transformadores de menor porte. Possuem como característica maior segurança em caso de incêndio quando comparados com o óleo mineral isolante (RECLAMATION, 2005).

Transformadores de potência são equipamentos de alto custo, são de difícil manuseio devido seu tamanho e peso e em muitos casos são produzidos sob encomenda. O tempo para reparo, e no pior caso substituição desses equipamentos, causará grandes prejuízos. Através da manutenção preditiva e análise cromatográfica é possível detectar falhas incipientes evitando a perda do equipamento. Para tal é necessária a aplicação de métodos para interpretação dos resultados da cromatografia (NOGUEIRA, 2004).

A fim de se determinar possíveis falhas nos transformadores, entre as práticas de manutenção destaca-se a análise de gases dissolvidos (do inglês *Dissolved Gas Analysis – DGA*).

Através da DGA é possível com base na estimativa da decomposição do óleo isolante associar prováveis falhas que possam estar ocorrendo internamente, como por exemplo, uma falha de origem elétrica ou térmica (IEEE, 1991).

Entre os critérios de detecção de falhas o Método do Triângulo de Duval é considerado um dos mais confiáveis. Trata-se de um método gráfico que foi desenvolvido tendo como base casos de análise de falhas reais em transformadores em operação (DUVAL, 2001).

Como desenvolvido por Barbosa (2016) é possível a aplicação do método de Duval para a construção de uma ferramenta computacional confiável para análise de óleos isolantes do tipo mineral em transformadores.

O Método de Duval foi desenvolvido inicialmente para transformadores que utilizam óleo mineral, porém pode ser adaptado para determinar falhas incipientes também em equipamentos que utilizam ésteres naturais e silicone como líquido isolante (DUVAL, 2010).

Este trabalho aborda a adaptação do Método de Duval para análise de óleos isolantes alternativos. Tem-se como referência o trabalho de Barbosa (2016) e objetiva-se dar continuidade aos estudos através da construção de uma ferramenta computacional que identifica falhas em transformadores que utilizam diversos tipos de óleo isolante como ésteres naturais e silicone.

1.1 OBJETIVOS

Esta seção estabelece o objetivo geral e o objetivo específico deste trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver o Método do Triângulo de Duval para adaptar a ferramenta computacional no diagnóstico de falhas incipientes em transformadores que utilizam óleo isolante do tipo silicone e éster natural. Realizar o comparativo com a literatura e trabalhos já realizados que analisam o óleo isolante mineral. Representar o método utilizado graficamente.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica referente as falhas em transformadores de potência e a análise de gases dissolvidos no óleo isolante do tipo silicone e vegetal, utilizando o Método do Triângulo de Duval;
- Adaptar uma ferramenta computacional para identificação de falhas implementando um algoritmo que identifique as falhas referentes ao óleo isolante silicone e éster natural;
- Representar graficamente os triângulos do Método de Duval mostrando a região na qual está o resultado e a falha identificada;
- Testar a confiabilidade da ferramenta em relação a precisão na detecção de falhas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

A realização deste trabalho será baseada no estudo e pesquisa em normas, artigos e livros sendo apresentada em 6 capítulos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

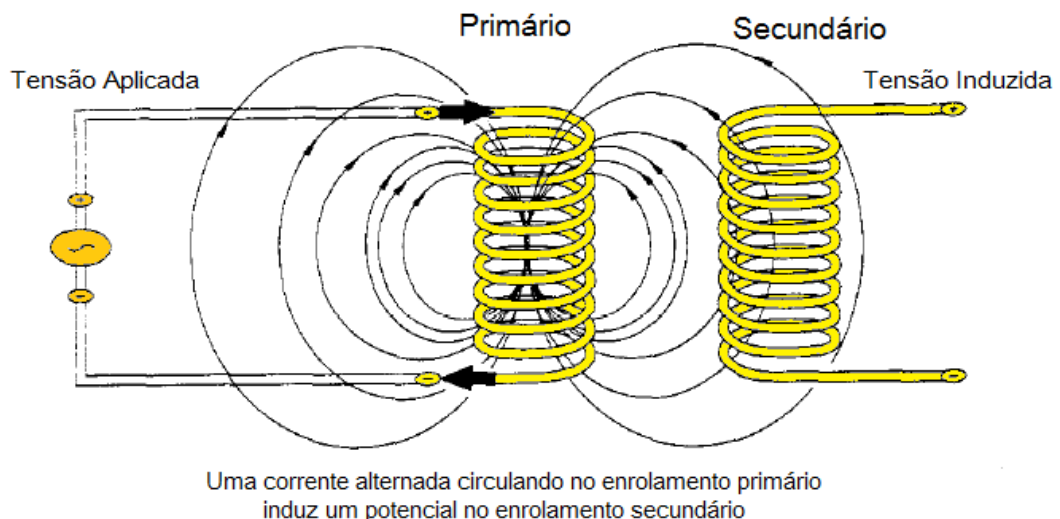
Esta seção apresenta a fundamentação teórica necessária para o estudo dos tópicos abordados neste trabalho.

2.1 INTRODUÇÃO A TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

Nesta seção será discutido o princípio de funcionamento dos transformadores elétricos.

Um transformador de potência é um dispositivo que altera uma tensão alternada ou corrente de um nível para outro. Transformadores de potência são usados para alterar as tensões que são produzidas pelos geradores para níveis que são adequados para a transmissão (tensão mais elevada, menor corrente). Por outro lado, um transformador é utilizado para alterar a transmissão de uma tensão elevada para níveis que são mais adequados para utilização nas mais diversas instalações (tensão inferior, corrente mais elevada). Como pode ser observado na Figura 1, energia elétrica pode sofrer inúmeras transformações entre a fonte e o ponto de consumo (HEADQUARTERS DEPARTMENT OF THE ARMY, 1998).

Figura 1 – Sistema esquemático de distribuição



Fonte: Headquarters Department of the Army (1998).

O transformador opera através da aplicação de uma tensão alternada ao enrolamento primário. Como a tensão aumenta, ele cria um campo magnético forte com diferentes linhas de força magnética (linhas de fluxo) que atravessam os

enrolamentos secundários. Quando essas linhas de fluxo envolvem o condutor, uma corrente é induzida. A medida que a magnitude da corrente no primário aumenta, as linhas de fluxo através do enrolamento secundário também aumentam, e um potencial é induzida neste enrolamento. Esse fenômeno conhecido como indução eletromagnética é a base de funcionamento do transformador (HEADQUARTERS DEPARTMENT OF THE ARMY, 1998).

O transformador é, portanto, definido como uma máquina elétrica estática, que é usado em sistemas de energia elétrica para a transferência de energia entre os circuitos através do uso de indução eletromagnética, normalmente com transformação dos valores de tensão e de corrente entre dois circuitos separados eletricamente. Basicamente ele é constituído por dois ou mais enrolamentos e um núcleo de material magnético que tem a tarefa de melhorar o acoplamento magnético entre os enrolamentos em si (LEONARD, 2010).

2.1.1 Tipos de transformadores

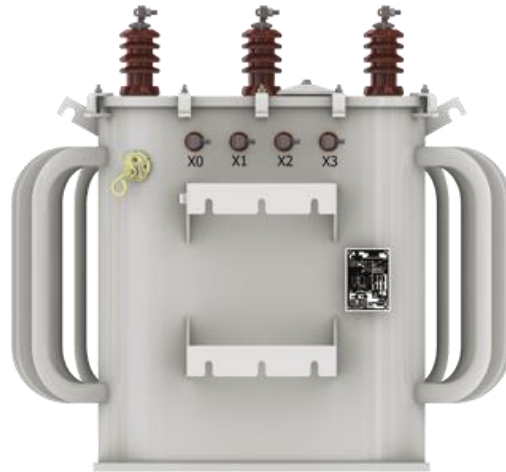
No sistema elétrico existem diferentes tipos de transformadores que possuem características específicas quanto a classe de tensão e potência. Podem ser classificados de maneira generalista em duas categorias: transformadores de distribuição e transformadores de potência.

Os transformadores de distribuição são aqueles que rebaixam a tensão para o nível de utilização dos usuários, estando localizados no final da cadeia do sistema elétrico. Existe grande variedade deste equipamento, dependendo do tipo de aplicação (SILVA, 2009).

No Brasil esses equipamentos são construídos conforme especificações técnicas regidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 5440 (NBR 5440, 2014).

Caso sejam instalados em poste o transformador de distribuição pode ser conforme o ilustrado na Figura 2.

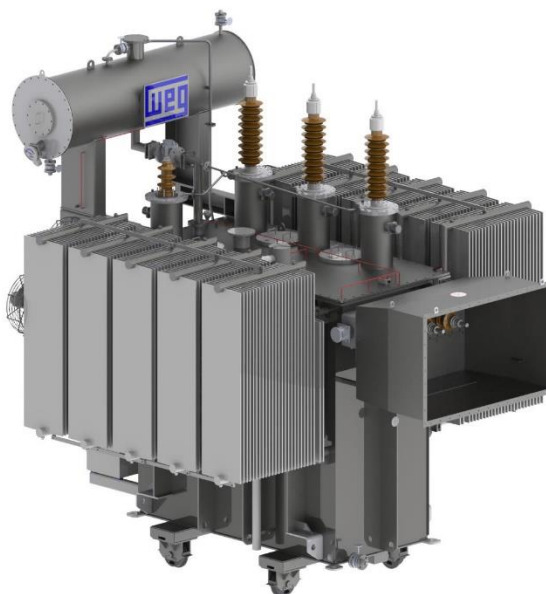
Figura 2 – Transformador de distribuição para instalação em poste



Os transformadores de potência por sua vez, estão presentes no início do sistema elétrico elevando a tensão de saída dos geradores. Estão presentes também na interligação de sistemas e na conexão com linhas de tensões mais reduzidas (AMARAL, 2007).

A Figura 3 representa um transformador de potência utilizado em subestações.

Figura 3 – Transformador de Potência



2.1.2 Princípios construtivos

O princípio de construção dos transformadores que utilizam óleo isolante são em sua maioria basicamente o mesmo, sendo que as diferenças estão nos acessórios que podem ser adicionados de acordo com a necessidade de aplicação.

São constituídos em sua maioria por: aço (carcaça e no núcleo); cobre (bobinas do núcleo); papel do tipo “Kraft” (isolante das bobinas de cobre); madeira para base de sustentação do núcleo (suporte mecânico); borracha (utilizada na vedação da tampa) e óleo isolante. Destaca-se ainda que a qualidade de componentes isolantes, principalmente papel de enrolamento e o óleo isolante, estão diretamente relacionados com a vida útil do equipamento. (LUZ JÚNIOR *et al.*, 2005).

Tais elementos de isolamento são discutidos nas seções a seguir.

2.1.3 Materiais isolantes

Para que o transformador opere de forma adequada, é necessário um eficiente sistema de isolamento e refrigeração, sendo utilizado para tal fluidos com propriedades de alta estabilidade térmica e elétrica (SILVA, 2009).

A combinação de papel e óleo isolantes, mais comumente óleo mineral é o conjunto utilizado em 95% dos equipamentos devido às excelentes características da dupla face às solicitações elétricas, mecânicas e térmicas no transformador (JAYME; NUNES, 1994).

A principal função do papel isolante no transformador é recobrir a parte ativa do equipamento, isolando os núcleos magnéticos, condutores de alumínio ou cobre, evitando assim curtos-circuitos (STOCCO, 2009).

Os isolantes sólidos do transformador são de origem celulósica, como o papel isolante. Entre os principais utilizados estão: o papel “Kraft” composto de fibra de madeira; o papel Manilha, composto de fibras de madeira e cânhamo e o papelão *Kraft*, também composto de fibra de madeira. O papel isolante é normalmente impregnado em óleo, resina e verniz, com o objetivo de retardar a penetração de água. O uso do verniz, entretanto, pode aumentar a probabilidade de aparecimento de descargas parciais, como será discutido posteriormente neste trabalho (MISLASCH, 1998).

2.2 ÓLEOS ISOLANTES

Entre os tipos de óleos isolantes utilizados, o Óleo Mineral Isolante (OMI) é o mais tradicionalmente utilizado na aplicação para transformadores, sendo aplicado desde o início do século XX. É constituído, de forma resumida, por uma mistura de hidrocarbonetos e compostos que apresentam nitrogênio, enxofre e oxigênio, sendo que esses encontram-se em menor proporção (PAIXÃO, 2006).

O óleo no transformador tem pelo menos quatro funções principais: prover isolamento, realizar o resfriamento, ajudar a extinguir arcos elétricos e dissolver gases gerados pela degradação do próprio óleo, gases gerados na isolação de celulose e da exposição com as condições externas (RECLAMATION, 2005)

A partir de 1985, a introdução de materiais resistentes a altas temperaturas possibilitou novas configurações no sistema convencional de isolação dos transformadores de potência, imersos em líquido e baseados em celulose-óleo (MARTINS *et al.*, 2007).

Devido a riscos que OMI pode oferecer para o meio ambiente, como contaminação do solo ou do lençol freático em caso de manutenção ou mesmo operação, alternativas para seu uso despertaram interesse de estudo. O Óleo Vegetal Isolante (OVI) ou éster natural está entre as alternativas exploradas, sendo este uma tecnologia relativamente recente, mas que apresenta características interessantes como a biodegradabilidade (TEMBOHLEN *et al.*, 2010).

Outra alternativa ao OMI é o Óleo Silicone (OS), o qual será estudado nas seções seguintes juntamente com o OVI.

2.2.1 Óleo Silicone

O fluido isolante do tipo silicone tem como principais características a alta estabilidade térmica, proporcionando maior segurança contra incêndio e o baixo risco de contaminação ambiental.

Este fluido vem sendo utilizado como isolante em transformadores desde de 1984 em pequenas aplicações. Além de ter características adequadas para esta aplicação, como baixa viscosidade relativa e alta lubrificação, este fluido dielétrico é menos agressivo ao ambiente do que o óleo mineral, como mencionado por McShane

(1999). Para melhor entendimento das características elétricas e físicas do fluido dielétrico a Tabela 1 a seguir permite comparar o silicone ao OMI.

Tabela 1 - Propriedades do fluido isolante silicone comparado ao OMI

Teste ASTM	Óleo Mineral	Óleo Silicone
Rigidez Dielétrica a 25C, kV	45	40
Viscosidade (cSt) 40 °C	9,2	39
Viscosidade (cSt) 100°C	2,3	17
Ponto de Combustão (°C)	165	343
Ponto de Fulgor (°C)	140	305
Calor Específico (cal/gr/°C)	0,39	0,36
Ponto de Fluidez (°C)	-50	-55
Gravidade Específica	0,87	0,96
Demanda Bioquímica de Oxigênio (ppm)	6	0

Fonte: Adaptado de (MCSHANE 1999).

Observa-se pela análise das características físico-químicas que o silicone possui ponto de fluidez semelhante ao óleo mineral, porém um maior ponto de combustão, o que pode ser considerado como uma vantagem. Uma desvantagem em relação ao OMI é o valor da gravidade específica, o que favorece o deslocamento de água entre a base e superfície do nível de óleo no transformador (MCSHANE, 1999).

Através das características semelhantes ao OMI e até mesmo vantagens em relação ao este, torna-se interessante aplicação do óleo silicone como fluido isolante em transformadores.

2.2.2 Éster Natural

O éster natural, ou óleo vegetal, é obtido através de oleaginosas, como milho, girassol, soja, entre outras fontes também renováveis, enquanto que o OMI é um produto derivado do petróleo, que é uma fonte finita (WILHELM *et al.*, 2006).

A utilização de ésteres naturais isolantes em transformadores de potência ganhou força na década de 1990 quando várias patentes foram registradas, incluindo os fluidos desse tipo mais utilizados atualmente: o BIOTEMP®, patenteado nos

Estados Unidos em 1999 pela ABB e o fluido Envirotemp FR3[®], patenteado por *Cooper Industries Inc.*

A utilização do óleo vegetal isolante em transformadores de potência é especificada na norma ABNT NBR 15422. A norma estabelece orientações para o sua embalagem, armazenamento e manuseio.

No Brasil estão comercialmente disponíveis o óleo isolante BIOTEMP[®], o Envirotemp FR3[®], BIOVOLT A[®] e BIOVOLT B[®] (WILHELM et al., 2006).

O BIOTEMP[®] é um isolante ecologicamente correto devido a sua característica biodegradável. É formulado a base de óleos com elevado conteúdo de oleico, mais de 80%, produzidos principalmente a partir de sementes que foram desenvolvidos por técnicas de manipulação genética (OOMMEN, 2002).

O fluido isolante Envirotemp FR3[®] tem como base de sua formulação óleos vegetais e aditivos de classe comestível, não contendo materiais à base de petróleo, halogêneos ou silicone. Foi comprovado como sendo não-tóxico em testes de toxidez aquática (SILVA, 2009).

Os isolantes BIOVOLT A[®] e BIOVOLT B[®] tem como base o óleo de milho e soja respectivamente.

A Tabela 2 a seguir lista valores típicos de propriedades do fluido vegetal BIOTEMP[®] e Envirotemp FR3[®].

Tabela 2 - Propriedades dos ésteres naturais isolantes BIOTEMP[®] e Envirotemp FR3[®]

Teste ASTM	BIOTEMP [®]	FR3 [®]
Rigidez Dielétrica a 25°C, kV (ASTM D877)	74	56
Viscosidade 40°C (ASTM D92)	41,89	34
Densidade Relativa a 15°C	0,91	0,96
Densidade Relativa a 25°C, D D129	-	0,92
Ponto de Combustão (°C) (ASTM D92)	347	275
Ponto de Fulgor (°C)	314	275
Calor Específico (cal/gr/°C) (ASTM D2766)	0,57	-
Índice de neutralização mg, KOH/g ASTM D974	0,075	0,04
Teor de água, ppm, ASTM 1533	150	30

Fonte: Adaptado de (OOMMEN 2002).

Além de funcionarem como materiais de isolação, ésteres naturais melhoram também a vida resultante prevista para o papel de celulose dos transformadores, sendo que isolamento com papel e OVI envelhecem a uma taxa inferior aos sistemas convencionais a base de óleo mineral (MCSHANE *et al.*, 2001).

3 ESTUDO DE FALHAS E MANUTENÇÃO EM TRANSFORMADORES

Nesta seção será realizada a fundamentação teórica referente ao estudo de falhas e procedimentos de manutenção do equipamento.

Transformadores são equipamentos projetados para durar cerca de 25 anos. Desde que a manutenção seja realizada de forma adequada, a vida útil do equipamento pode chegar à 40 ou até mesmo 50 anos (SILVA, 2009).

A manutenção desempenhada em um determinado equipamento pode ser do tipo: manutenção corretiva, manutenção preventiva, manutenção preditiva, manutenção autônoma.

Destaca-se aqui, pelo objetivo de estudo deste trabalho, a manutenção preditiva e preventiva, que tem como objetivo determinar o tempo correto da necessidade de intervenção evitando assim desmontagens para inspeção e utilização do componente até o máximo de sua vida útil (VIANA, 2002).

A manutenção em transformadores tem como objetivo manter o núcleo e enrolamentos em condições satisfatórias de operação, abrangendo a realização de análises do óleo isolante e testes de componentes (BECHARA, 2010).

O plano mínimo de manutenção estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define as atividades mínimas de manutenção preditiva e preventiva e suas periodicidades para transformadores de potência e autotransformadores. As atividades mínimas de manutenção em transformadores consistem em: análise dos gases dissolvidos no óleo isolante, ensaio físico-químico do óleo isolante e manutenção preventiva periódica. A ANEEL define que a periodicidade máxima para realização da análise de gases dissolvidos no óleo isolante é de seis meses (ANEEL, 2015).

3.1 FALHAS NOS TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

Apesar do funcionamento do transformador ocorrer em regime contínuo, o valor da carga varia clinicamente ao longo do tempo. Alguns dos problemas que podem surgir no equipamento estão relacionados ao funcionamento em regime contínuo, mas podem ainda haver outros, resultantes de situações acidentais. O regime de carga do transformador pode também promover o envelhecimento

premature dos materiais estruturais. As situações transitórias por sua vez, pode atingir valores muito elevados, alterando as características de diversos materiais, ou mesmo danificar a estrutura mecânica do transformador (GUEDES, 2003)

Mesmo operando na normalidade, o transformador é um equipamento que sofre envelhecimento natural e com isso redução da sua capacidade de isolamento, o que leva redução da vida útil estimada. O aquecimento, a umidade e o oxigênio são os principais fatores primários externos que provocam a degradação da celulose e do óleo. Os processos (falhas) que atuam reduzindo a capacidade de isolamento, quando em fase bem inicial são chamadas falhas incipientes. Falhas incipientes são normalmente recuperáveis com custo reduzido (ZIRBES, *et al.*, 2005).

Como mencionado por Benedet (2008), dentre as falhas que podem ocorrer no transformador, destaca-se as descargas parciais, aquecimento e arcos-elétricos que serão discutidas nas seções seguintes.

3.1.1 Falhas Térmicas

O sobreaquecimento do transformador é causado por perdas elétricas nos enrolamentos primário e secundário e no núcleo magnético, descargas elétricas ou ainda o mau funcionamento do sistema de refrigeração. O aquecimento atípico do transformador resulta na formação de gases dissolvidos no óleo isolante (CAMARGO, 2006).

A formação de gases dissolvidos no óleo vegetal acontece com menores temperaturas quando comparado com o OMI. O OMI entre temperaturas de 150°C até 500°C se decompõe no hidrogênio (H₂), metano (CH₄) e traços de etileno (C₂H₄) e etano (C₂H₆) entre outros gases. Para o OVI como o FR3[®], por exemplo, a temperaturas relativamente baixas entre 90°C a 200°C ocorre formação em quantidades significativas de hidrogênio (H₂) e etano (C₂H₆) (AMORA, 2013; DUVAL *et al.*, 2010).

As falhas térmicas influenciam também na decomposição da isolamento celulósica do equipamento. A decomposição do papel isolante resulta na produção de monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂). Devido ao fato da degradação do papel ocorrer em temperaturas menores do que a do fluido, os gases gerados durante esse processo podem ser encontrados em transformadores que estão operando em condições normais (IEEE, 2014).

A presença do monóxido de carbono (CO) é um importante indicativo na degradação do papel isolante. Relaciona-se a concentração de monóxido de carbono (CO) e o dióxido de carbono (CO₂) para avaliar essa decomposição qualitativamente (BARBOSA, 2013).

3.1.2 Falhas Elétricas

As falhas elétricas são analisadas como descargas parciais, chamadas também de descargas de corona, e arcos elétricos.

As descargas parciais são causadas pela ionização do fluido nas proximidades de um condutor devido a um campo elétrico muito intenso. O fluido torna-se parcialmente condutivo nas redondezas do condutor (BARTINICAS, 1979).

Considerando volumes iguais de óleo e condições de falta idênticas, a concentração em partes por milhão (ppm) dos gases gerados no OMI e no óleo isolante silicone seriam semelhantes enquanto que a concentração no OVI seria aproximadamente dez vezes menor (IEEE, 2014).

Arco elétrico é o resultado de uma ruptura dielétrica do fluido entre dois eletrodos a qual resulta em uma descarga elétrica devido ao fluxo de corrente em meio normalmente isolante (BENEDET, 2008).

Na ocorrência do arco elétrico altas temperaturas são atingidas (acima de 700°C) sendo produzidos hidrogênio (H₂), metano (CH₄), etano (C₂H₆), etileno (C₂H₄), acetileno (C₂H₂), dióxido de carbono (CO₂) e monóxido de carbono (CO), sendo este último produzido em diferentes proporções comparando-se ao óleo mineral. (IEEE, 1991; IEEE, 2014).

3.2 TEORIA DE FORMAÇÃO DE GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO ISOLANTE

Todos os transformadores que utilizam óleo isolante/refrigerante geram gases dissolvidos mesmo que operando em condições normais. Esses gases podem, de acordo com a concentração, indicar uma anormalidade na operação do equipamento, sendo um aquecimento local ou generalizado, problemas no material dielétrico ou combinação desses dois (IEEE, 2014).

Cada uma dessas anormalidades (falhas) gera gases que são geralmente combustíveis, mas podem também ser não combustíveis. Porém, a análise dos gases

combustíveis é que irá determinar a existência de uma ou mais falhas. A taxa de gases específicos (chamados de *key gases*) irão determinar o tipo de falha no equipamento. A interpretação de gases de forma individual se torna difícil, porém, quando existe mais de uma falha, ou quando um tipo de falha evolui para outra, como um problema térmico que vem a se tornar um problema elétrico. As amostras de gases precisam então ser comparadas com resultados de referência, sendo assim possível identificar mudanças no comportamento do equipamento (IEEE, 2014).

Transformadores que utilizam silicone como óleo isolante apresentam maior concentração de monóxido de carbono (CO) do que qualquer outro tipo de óleo isolante, o que torna a análise mais complexa, sendo difícil determinar se a concentração desse gás é proveniente do envelhecimento do equipamento ou da ocorrência de falhas. A concentração de hidrogênio é também maior nesse tipo de óleo, principalmente comparado com o OMI. No caso do acetileno, caso seja identificada sua geração, a ocorrência de arcos elétricos já pode ser tomada como certa (IEEE, 2014).

Assim como óleo silicone, para OVI a geração de gases dissolvidos a partir de sua composição dependerá da temperatura. A Tabela 3 representa os principais gases dissolvidos no OVI e no óleo silicone.

Tabela 3 – Gases dissolvidos nos fluidos isolantes BIOTEMP®, Envirotemp FR3® e silicone

Combustíveis	Não Combustíveis
Monóxido de carbono (CO)	Dióxido de carbono (CO ₂)
Hidrogênio (H ₂)	Oxigênio (O ₂)
Metano (CH ₄)	Nitrogênio (N ₂)
Etano (C ₂ H ₆)	
Etileno (C ₂ H ₄)	
Acetino (C ₂ H ₂)	

Fonte: Adaptado de (MISLACH, 1998).

Os gases tomados para análise de gases dissolvidos DGA - do termo em inglês *Dissolved Gas Analysis* - em equipamentos que utilizam OVI e óleo silicone são semelhantes aos tomados para OMI, sendo que as concentrações que irão determinar

a ocorrência de falhas são diferentes. As análises serão discutidas detalhadamente nas seções seguintes.

3.3 ANÁLISE DOS GASES DISSOLVIDOS NO ÓLEO ISOLANTE

A análise de gases dissolvidos é o primeiro indicador de um problema podendo identificar deterioração do isolamento e do óleo, sobreaquecimento, descargas parciais e arcos elétricos. A “saúde” do óleo reflete a saúde do próprio transformador. A DGA consiste em utilizar amostras do óleo isolante para análise cromatográfica em laboratório (RECLAMATION, 2005).

Análise cromatográfica é um método físico-químico que realiza a separação de componentes de uma mistura em duas fases, sendo uma estacionária e outra móvel. A primeira etapa é a amostragem, a segunda é a extração dos gases propriamente ditos e a terceira análise através do cromatógrafo, sendo os valores expressos em partes por milhão (NBR 7070, 2006).

De acordo com Duval (2006), os métodos DGA mais utilizados para interpretação dos resultados são: Método de Dornenburg, Rogers e do Gás Chaves conhecidos como métodos do IEEE; além da Relação dos códigos IEC e do Método do Triângulo de Duval. A Tabela 4 compara os métodos mencionados.

Tabela 4 – Comparação entre os métodos de DGA

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

Fonte: (DUVAL 2003).

Não existe um método universal de interpretação de dados da DGA, sendo que transformadores são máquinas complexas e diferentes umas das outras. Este

trabalho aborda o Método do Triângulo de Duval que ao ser adaptado pode ser aplicado ao OVI e OS. Nas seções seguintes o método será discutido.

4 APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DO TRIÂNGULO DE DUVAL ADAPTADO

Esta seção discute o método, a adaptação para óleos isolantes alternativos e o desenvolvimento da ferramenta para análise.

4.1 MÉTODO DO TRIÂNGULO DE DUVAL PARA DGA

Michel Duval desenvolveu o método na década de 1960 usando como base de dados o resultado de milhares de diagnósticos de DGA e falhas em transformadores. O Método dos Triângulos de Duval se mostrou preciso e confiável ao longo dos anos (RECLAMATION, 2005).

4.1.1 Triângulo de Duval tradicional

Consiste basicamente no mapeamento de um triângulo equilátero em zonas de falhas. Plota-se a porcentagem de um gás que pode ser o acetileno, etileno ou metano em uma aresta do triângulo, sendo então traçada uma reta paralela as marcações de 0 até 100% feitas nesta aresta. Repete-se o procedimento para as outras duas arestas/gases restantes. O ponto de intersecção das três arestas estará localizado em uma zona do triângulo que representa uma falha (RECLAMATION, 2005).

Analisando um amplo número de casos de falhas, foram deduzidas empiricamente as regiões de fronteira do Triângulo de Duval. Através da análise de inspeção das ocorrências de falha e posteriormente a concentração de gases foi possível representar a cada tipo de falha com a quantidade de gás gerado. Através dessa relação, Duval determinou os valores limites das fronteiras que aparecem plotados no triângulo da Figura 4 (DUVAL, 2002).

Existe a possibilidade de um ponto se encontrar em cima da fronteira entre duas zonas de falha, sendo que neste caso a identificação da falha será ambígua.

É necessário conhecer a concentração percentual dos gases para que se possa utilizar este método. O cálculo se dá pela divisão da concentração em partes por milhão de cada gás (acetileno, etileno e metano) pela soma da concentração dos três também em ppm. Multiplica-se então por 100% para se obter o valor percentual (DUVAL, 2002).

As equações a seguir representam as concentrações como mencionado:
Concentração percentual de metano:

$$\%CH_4 = \frac{100\% * x}{x + y + z} \quad (1)$$

Concentração percentual de etileno:

$$\%C_2H_4 = \frac{100\% * y}{x + y + z} \quad (2)$$

Concentração percentual de acetileno:

$$\%C_2H_2 = \frac{100\% * z}{x + y + z} \quad (3)$$

Onde:

- x: concentração CH_4 em ppm;
- y: concentração C_2H_4 em ppm;
- z: concentração C_2H_2 em ppm.

O Triângulo de Duval representa 3 falhas de origem térmica, 3 de origem elétrica e uma que indica a mistura de falhas elétricas e térmicas (DUVAL, 2002).

Cada zona possui um código que denomina um tipo de falha. A Tabela 5 relaciona os códigos com a determinada falha e descreve a ocorrência da determinada falha.

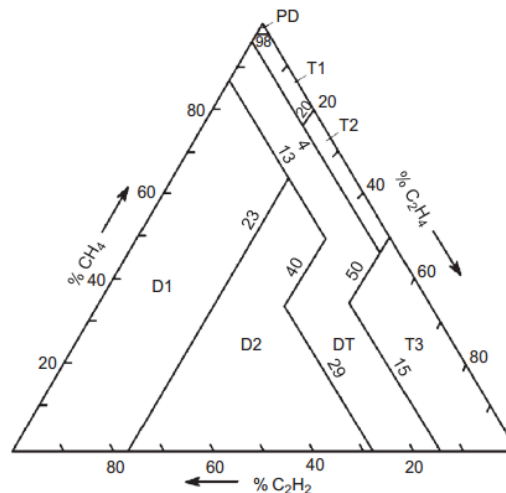
Tabela 5 – Codificação das falhas do Triângulo de Duval		(continua)
Código	Falha	Exemplos
PD	Descargas Parciais	Descargas do tipo plasma frio (Corona), com possível formação de X-wax no papel.
D1	Descargas de baixa energia	Descargas parciais com centelhamento, com indução de pequenos furos carbonizados no papel.

Tabela 5 – Codificação das falhas do Triângulo de Duval		(conclusão)
Código	Falha	Exemplos
D2	Descargas de alta energia	Descargas de alta energia no papel e no óleo, com extenso dano ao papel ou grande formação de partículas de carbono no óleo e fusão no metal.
DT	Mistura de falhas	Mistura de falhas elétricas e falhas térmicas no transformador.
T1	Falha Térmica, (T<300°C)	Evidenciada pelo papel que se tornar amarronzado (>200°C) ou carbonizado (>300°C).
T2	Falha Térmica, (300<T<700°C)	Carbonização do papel e formação de partículas de carbono no óleo.
T3	Falha Térmica, (T>700°C)	Extensa formação de partículas de carbono no óleo, coloração metálica 800°C ou fusão do metal >1000 °C.

Fonte: Adaptado de (DUVAL, *et al.*, 2001).

A Figura 4 é o Triângulo de Duval mapeado para OMI com as zonas de falhas conforme descritas na Tabela 5.

Figura 4 – Representação gráfica do Triângulo de Duval para OMI



Fonte: Duval (2002).

Como mencionado por Duval (2010), foi comparado em laboratório dados da DGA em OMI e óleo-não mineral, como o OVI e OS, indicando que os mesmos tipos de gases são formados para as determinadas falhas, porém com diferenças quantitativas nas taxas de formação.

4.1.2 Triângulo de Duval adaptado

O Triângulo de Duval para DGA em OMI foi deduzido a partir de um amplo número de casos e amostras de falhas em transformadores. Para análise em óleo não-mineral, foram comparados em laboratório diferentes tipos de óleo (BIOTEMP®, FR3®, silicone, entre outros) sob as mesmas condições experimentais que o OMI a fim de se estabelecer padrões de geração de gases dissolvidos (DUVAL, *et al.*, 2010).

A Tabela 6 indica as diferenças observadas entre OMI e os não-minerais investigados neste trabalho.

Tabela 6 – Comparação da formação de gases em laboratório presentes em OM e não-mineral (unidades arbitrárias)

	Mineral	Midel	Silicone	FR3®	BIOTEMP®
1200 °C					
CH ₄	2,17	3,14	1,15	2,80	3,86
C ₂ H ₄	12,5	17,8	1,59	6,14	10,71
C ₂ H ₆	1,61	2,2	0,13	0,65	1,16
C ₂ H ₂	1,61	3,2	0,26	0,96	2,43
700 °C					
CH ₄	0,73	1,07	0,13	1,41	1,34
C ₂ H ₄	2,57	5,15	0,30	4,09	5,17
C ₂ H ₆	0,99	2,13	0,04	1,28	1,82
C ₂ H ₂	-	-	-	-	-

Fonte: (DUVAL, *et al.*, 2010).

As diferenças entre OMI e os óleos isolantes não-minerais ocorrem principalmente nas zonas de falha T1-T3. Através dessas diferenças é possível ajustar as zonas de fronteira para cada tipo de óleo não-mineral (DUVAL, 2008).

A Tabela 7 indica as alterações realizadas por Duval nas fronteiras das zonas falhas em óleo não-mineral.

Tabela 7 – Alterações nas fronteiras das zonas de falhas para óleo isolante não-mineral comparadas com OMI (em %C₂H₂)

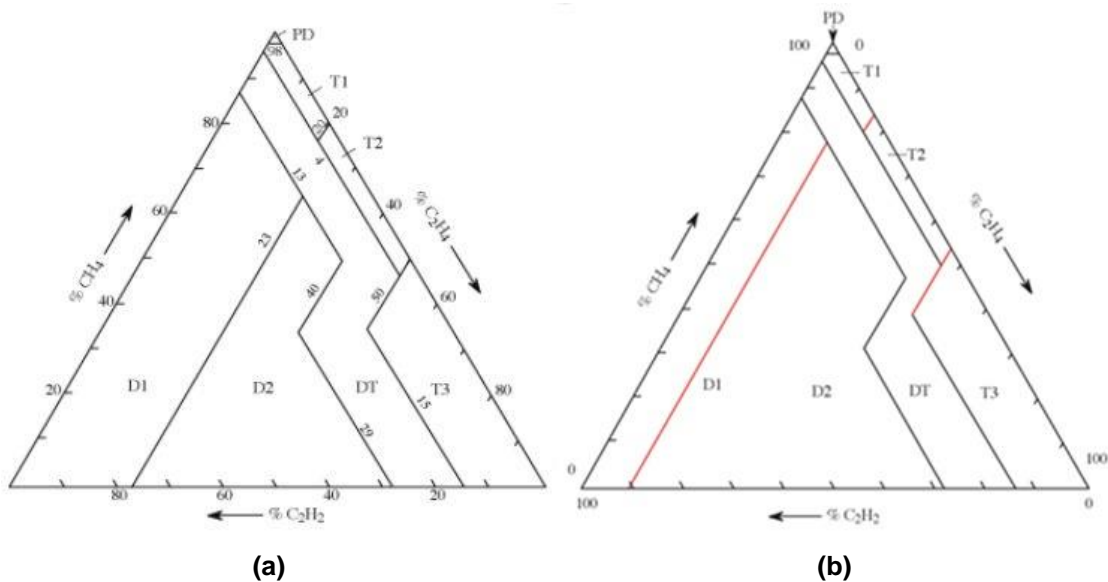
	Mineral	Silicone	Midel	FR3 [®]	BIOTEMP [®]
D1/D2	23	9	26	25	20
T1/T2	20	16	39	43	52
T2/T3	50	46	68	63	82

Fonte: (DUVAL, et al., 2010).

Os respectivos triângulos para DGA no óleo silicone, FR3[®], e BIOTEMP[®] são mostrados na sequência.

Para o óleo silicone, as linhas na cor vermelha representam as alterações nas fronteiras em comparação ao Triângulo de Duval para OMI de acordo com a Tabela 7.

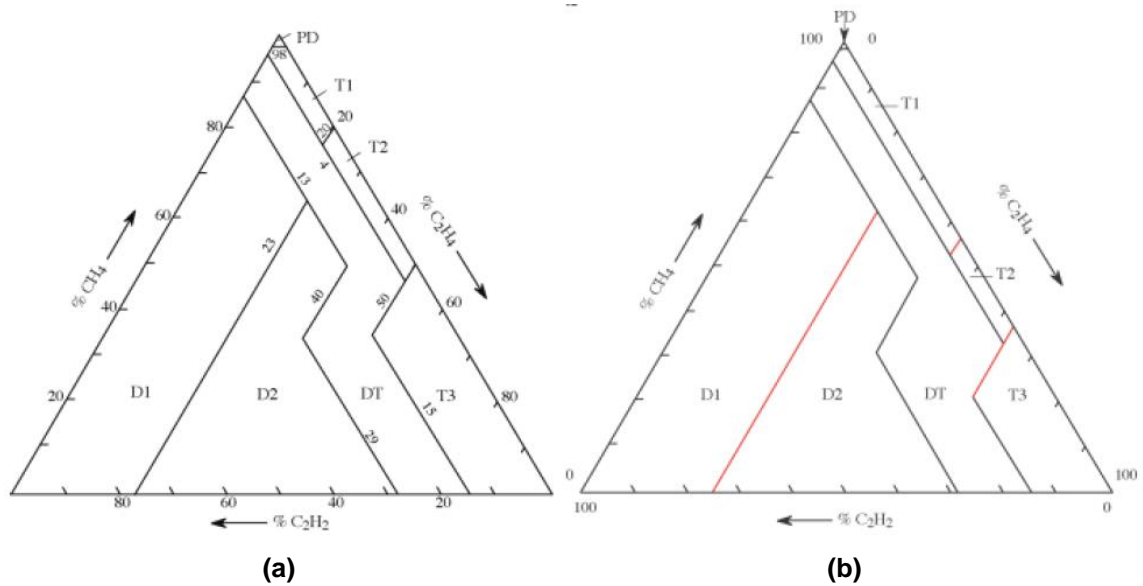
Figura 5(a) – Triângulo de Duval tradicional e 5(b) – Triângulo de Duval para óleo silicone



Fonte: Duval (2008).

Para o éster natural FR3[®], as linhas na cor vermelha representam as alterações nas fronteiras em comparação ao Triângulo de Duval para OMI.

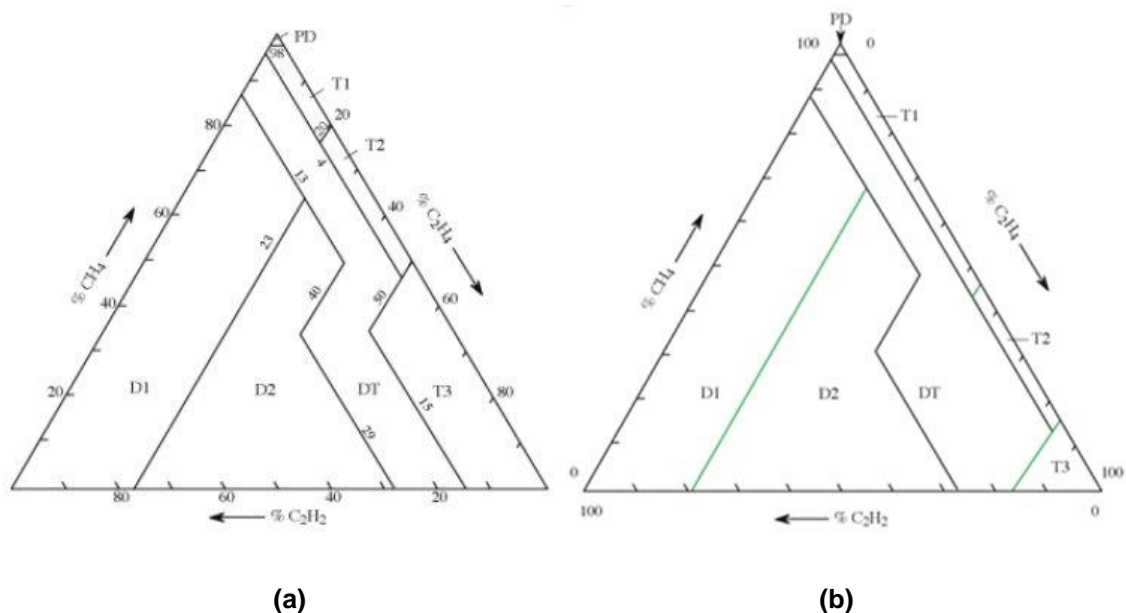
Figura 6(a) – Triângulo de Duval tradicional e 6(b) – Triângulo de Duval adaptado éster FR3®



Fonte: Duval (2008).

Para o éster natural BIOTEMP®, as linhas na cor verde representam as alterações nas fronteiras em comparação ao Triângulo de Duval para OMI.

Figura 7(a) – Triângulo de Duval tradicional e 7(b) – Triângulo de Duval adaptado éster BIOTEMP®



Fonte: Duval (2008).

Em especial o óleo FR3® produz mais gases que não são consequência de falhas no equipamento, os chamados “stray gases”. A produção de hidrogênio e etano em temperaturas relativamente baixas, de 90°C até 200°C é maior nesse tipo de óleo.

Torna-se necessário o uso de um triângulo específico para diferenciar a formação destes gases de falhas mais severas como sobreaquecimento ou carbonização do papel isolante (WANG, 2007).

O triângulo para falhas de baixa temperatura em FR3[®], também chamado de Triângulo número 6, é baseado nas concentrações de metano, hidrogênio e etano, sendo que estes dois últimos gases substituem o etileno e o acetileno. As zonas de falha são codificadas conforme a Tabela 8:

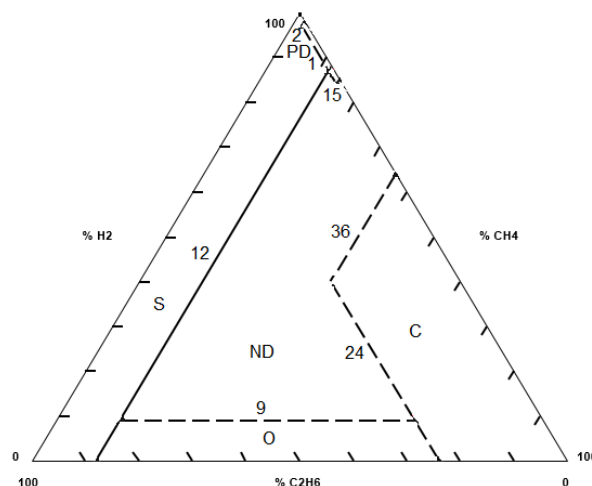
Tabela 8 – Codificação das falhas do FR3[®] baixas temperaturas

Código	Falha
S	“Stray gassing” – não representa falha Sobreaquecimento e carbonização do papel isolante
C	(T>300°C)
O	Sobreaquecimento
PD	Descargas parciais
ND	Não determinado

Fonte: Adaptado de (DUVAL, et al., 2010).

O triângulo para falhas de baixa temperatura em óleo FR3[®] descrito é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Triângulo para falhas de baixa temperatura em óleo FR3[®]



Fonte: Adaptado de Duval (2010).

Existem limites mínimos para que o método seja aplicado. A concentração de gases gerados pelas falhas incipientes, deve ser, para pelo menos um dos gases, igual ou superior aos limites L1 e a taxa de geração de gás ser igual ou superior a G1 (ppm/mês) apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Limites para aplicação do método de Duval

Gás	Limites L1 (ppm)	Limites G1 (ppm/mês)
H ₂	100	50
CH ₄	75	38
C ₂ H ₂	3	2
C ₂ H ₄	75	38
C ₂ H ₆	75	38
CO	700	350
CO ₂	7000	3500

Fonte: Adaptado de (RECLAMATION, 2005).

4.2 DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS

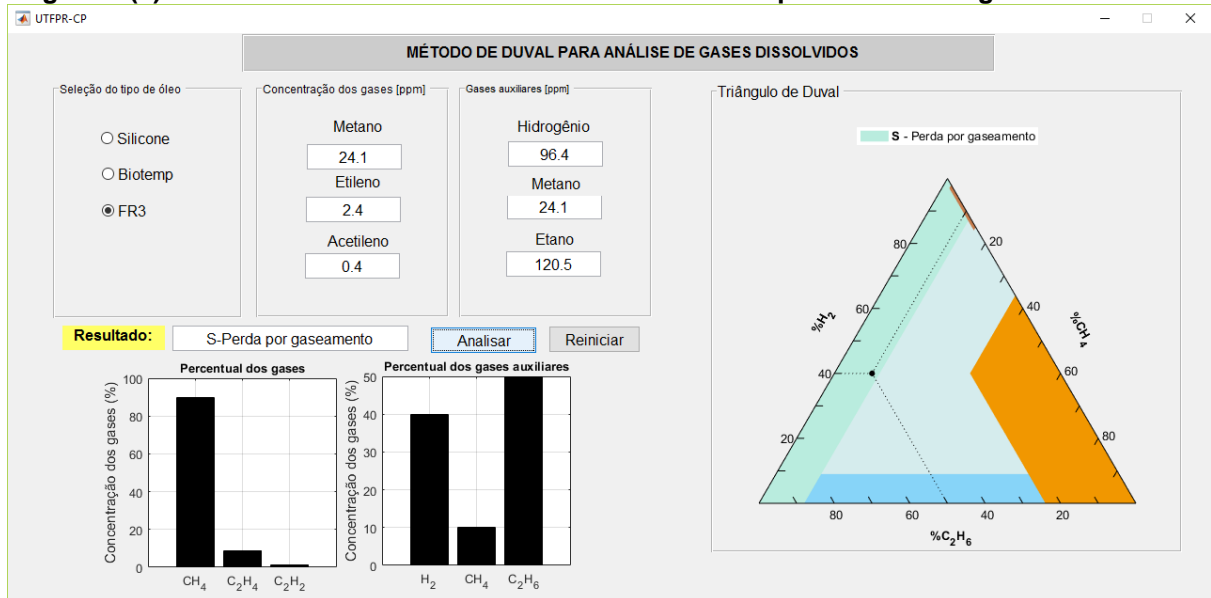
Com o intuito de produzir uma ferramenta de auxílio na detecção de falhas incipientes foi utilizado o software MATLAB (Matrix Laboratory) e o ambiente de desenvolvimento de aplicativos GUIDE. Esse ambiente possibilita o desenvolvimento de aplicativos com interface gráfica, chamada de GUI (do inglês *Graphical User Interface*).

A Figura 9 (a) representa a interface desenvolvida. Este ambiente tem como objetivo possibilitar a seleção de um tipo de óleo isolante para análise, utilizar os resultados do ensaio cromatográfico como entrada de dados, apresentar um gráfico do cálculo das concentrações percentuais de cada gás utilizado na análise e identificar a falha incipiente através do resultado gráfico fornecido pelo triângulo de Duval.

O usuário deverá selecionar o tipo de óleo isolante. Existem as opções de óleo silicone, éster BIOTEMP® e éster FR3® a qual apenas um óleo deve ser selecionado. Uma janela de diálogo é apresentada para que seja confirmada a seleção do isolante. Caso esteja correta a seleção, o usuário deverá informar as concentrações de gases em partes por milhão (ppm). Ao ser concluída a análise, o

triângulo de Duval é apresentado à esquerda do ambiente como resultado gráfico do estudo identificando a falha incipiente.

Figura 9 (a) – Interface desenvolvida em ambiente MATLAB para análise de gases dissolvidos



Fonte: Autoria própria.

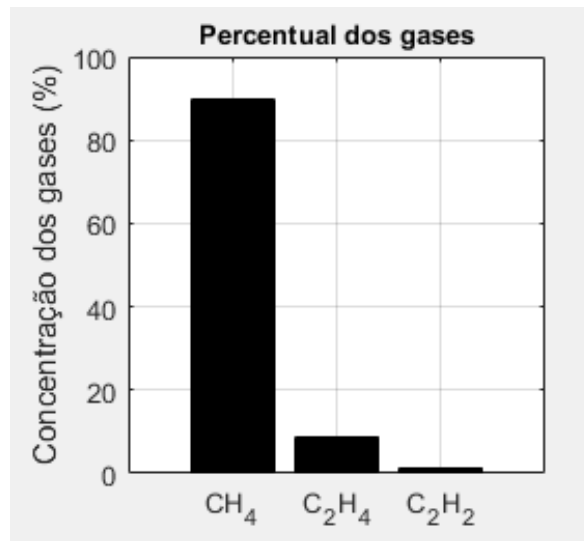
A Figura 9 (b) mostra em detalhes as opções de seleção do dielétrico em estudo e a entrada de dados. A análise tem início através do botão “Analisar”. A falha identificada é informada na lacuna denominada “Resultado” identificada com a cor amarela. O processo pode ainda ser reiniciado através do botão “Reiniciar”.

Figura 9 (b) – Ambiente para seleção do isolante, entrada de dados e resultado no aplicativo

Fonte: Autoria própria.

A Figura 9 (c) ilustra o gráfico auxiliar utilizado para a aplicação do método, representando a concentração percentual dos gases metano, etileno e acetileno presentes na amostra. Essa informação é relevante para localização da falha no Triângulo de Duval. Na Figura 9 (a) são apresentados dois gráficos devido a análise complementar necessária para éster FR3®.

Figura 9 (c) – Percentual de gases metano, etileno e acetileno presentes na amostra

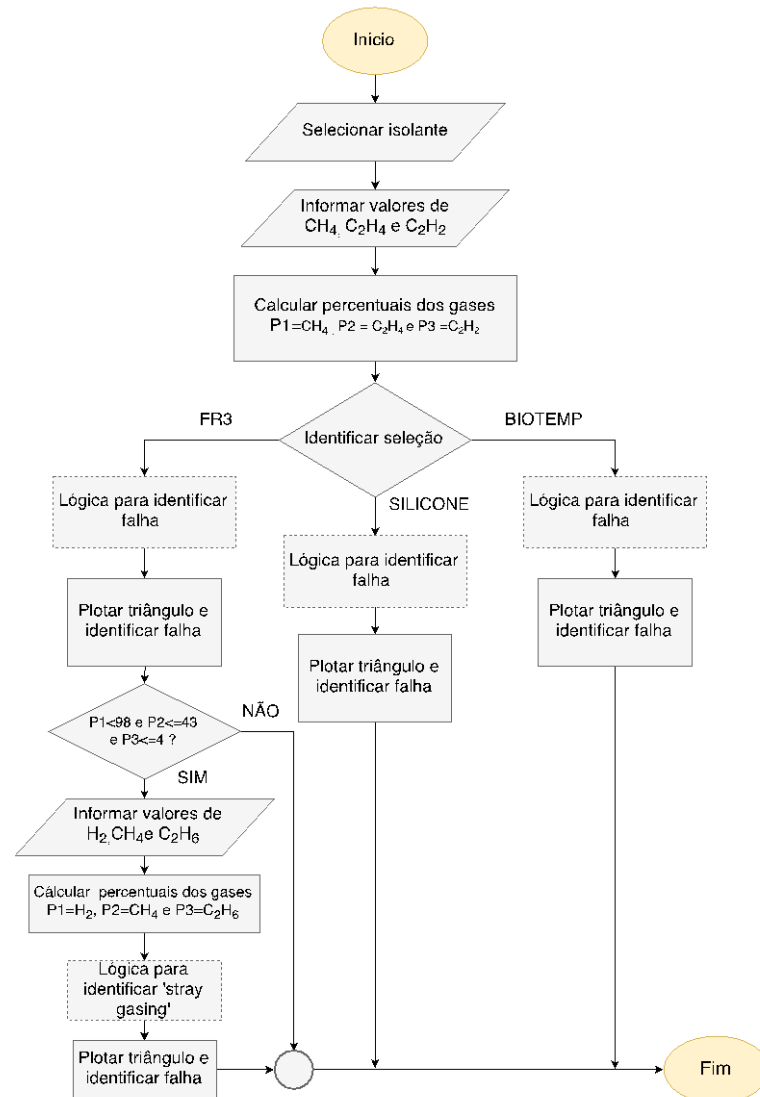


Fonte: Autoria própria.

Caso o tipo de óleo em análise seja o FR3® e o tipo de falha identificada seja “Falha térmica de baixa temperatura” torna-se necessária uma análise mais detalhada, conforme discutido na seção 4.1.2. Requer-se as concentrações dos gases hidrogênio, metano e etano através de janela de diálogo. Em seguida a coluna denominada “Gases auxiliares” é habilitada para entrada de valores. Ao serem informados tais valores, apresenta-se um gráfico percentual de gases e o Triângulo de Duval para falha de baixa temperatura em FR3®. O resultado dessa análise complementar é exibido da mesma forma, na parte central da janela identificada como “Resultado”.

A lógica de execução é ilustrada através do fluxograma na Figura 10. No desenvolvimento foram atribuídas às concentrações percentuais as variáveis P1, P2 e P3 para os gases metano, etileno e acetileno, respectivamente. Na análise complementar do éster FR3® foram atribuídas as variáveis P1, P2, P3 aos gases hidrogênio, metano e etano, respectivamente.

Figura 10 - Fluxograma que representa a lógica da análise de gases.



Fonte: Autoria própria.

Ao ser apresentado o resultado, o usuário pode optar pela análise de outro tipo de óleo isolante e reiniciar o processo através do botão “Reiniciar” ou simplesmente limpando a entrada de dados selecionando o fluido desejado.

4.2.1 Construção do Triângulo e Delimitação das Regiões de Falhas

Para a construção do triângulo no aplicativo bem como o mapeamento das regiões de falha os percentuais dos gases foram convertidos em coordenadas cartesianas. Utiliza-se, portanto, a conversão ao invés das coordenadas triangulares discutidas previamente e empregadas no método manual. Pelo fato do Triângulo de

Duval tratar-se de um triângulo equilátero utilizou-se relações métricas e semelhanças de triângulos para tal transformação. Com a localização e plotagem de pontos dentro do triângulo foi possível delimitar regiões de acordo com cada éster analisado.

A técnica utilizada para plotagem do triângulo utilizado na análise foi baseada na aplicação para análise de óleo mineral desenvolvido em Barbosa (2016), sendo aqui adaptada.

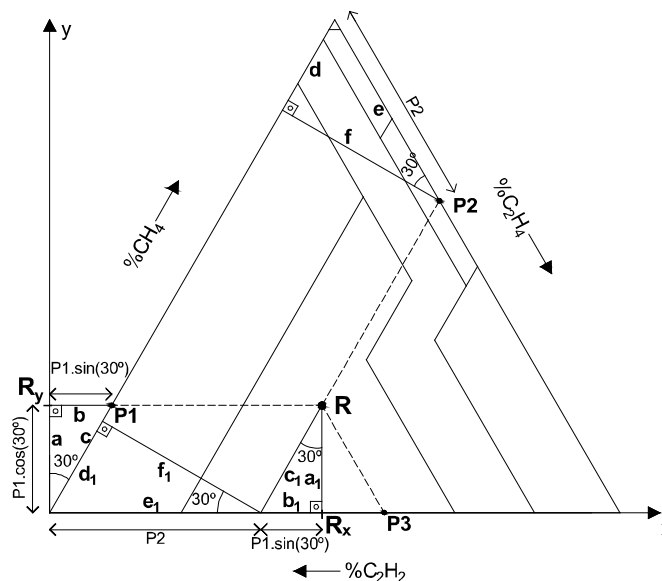
A Figura 11 ilustra as operações geométricas para localizar um ponto qualquer baseado em coordenadas cartesianas conhecendo-se as contrações dos gases (denominadas aqui P1, P2, P3). O ponto é chamado de “R” e suas coordenadas cartesianas são representadas por R_x e R_y . A coordenada R_y é obtida através da relação métrica no triângulo “abc” formado entre o eixo das ordenadas e aresta do triângulo. A relação é descrita na equação (4). A coordenada R_x é o resultado da soma das arestas e_1 e b_1 dos triângulos $a_1b_1c_1$ e $d_1e_1f_1$ definidos através da semelhança de triângulos abc no lado inferior esquerdo e o triângulo def no lado superior. A equação (5) representa a coordenada R_x para o ponto discutido

$$R_y = P1 * \cos(30^\circ) \quad (4)$$

$$R_x = P2 + (P1 * \sin(30^\circ)) \quad (5)$$

Através da Figura 11 apresentam-se os triângulos, abc , $a_1b_1c_1$, def e $d_1e_1f_1$ mencionados.

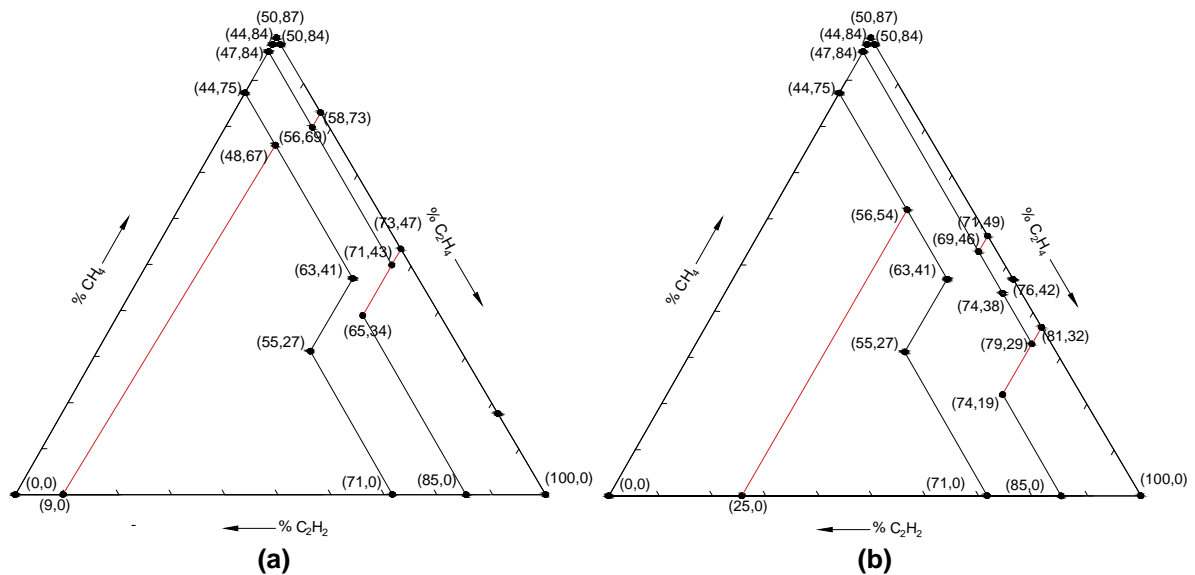
Figura 11 - Obtenção das coordenadas cartesianas R_x e R_y para um ponto no triângulo



Fonte: Barbosa (2016).

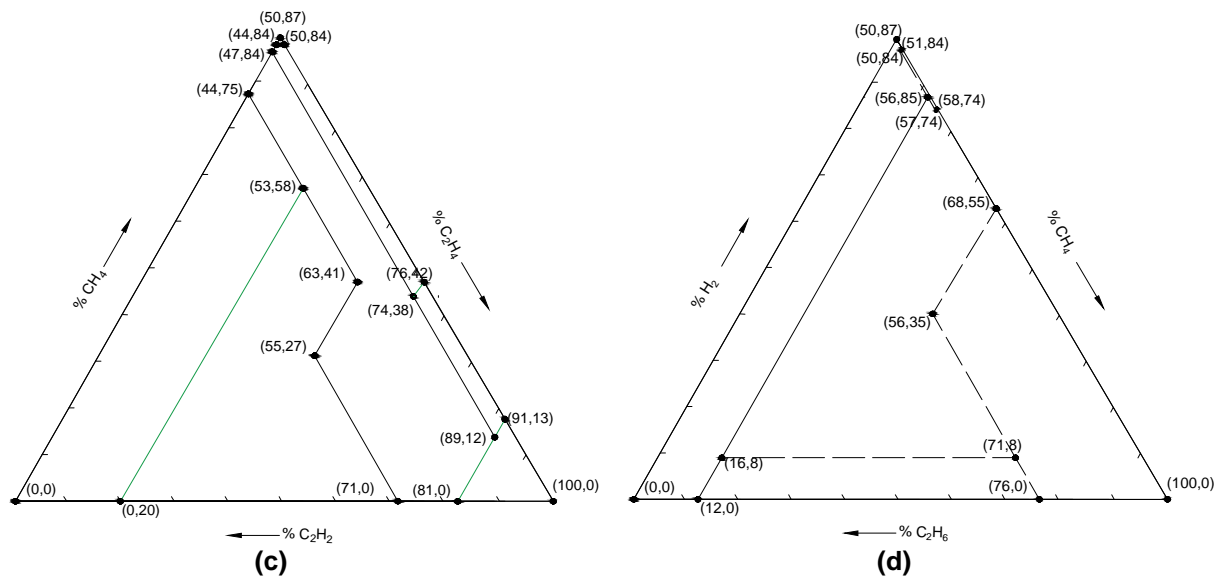
Conhecendo-se os valores limites das fronteiras discutidos na seção 4.1.2 e através da transformação de coordenadas, foi possível representar todos os pontos utilizados na delimitação de zonas de falhas como ilustrado na sequência:

Figura 12(a) - Delimitação de zonas falhas para óleo Silicone e 12(b) - Delimitação de zonas de falhas para éster FR3®



Fonte: Autoria própria.

Figura 12(c) - Delimitação de zonas de falhas para éster BIOTEMP® e 12(d) - Delimitação de zonas de falhas para éster FR3® baixa temperatura



Fonte: Autoria própria.

Desta forma foi possível traçar o gráfico utilizado pelo método, delimitar as regiões de falha e posteriormente localizar qualquer ponto dentro do triângulo.

4.2.2 Localização da Falha no Triângulo

As concentrações percentuais calculadas dos *key gases* são utilizada para definir um ponto dentro do triângulo. Para verificar sua localização dentre as regiões de falhas, foram utilizadas no aplicativo as condições lógicas “if” e “ifelse”. Essas condições delimitam regiões baseadas nas concentrações percentuais dos gases. Para determinação de uma região pode ser necessário a concentração de um ou mais gases, sendo nesse caso utilizado o operador lógico “and” (função &&).

Existem nos triângulos de Duval adaptados cinco regiões de falhas que formam polígonos convexos e duas regiões que formam polígonos côncavos. Polígonos côncavos possuem algum de seus ângulos internos com medida maior que 180° o que dificulta a localização de um ponto dentro da região que este polígono representa.

Para localização de pontos nas regiões de falhas D2 e DT, regiões estas formadas por polígonos côncavos, uma alternativa apresentada em Barbosa (2016) é a divisão dessas regiões côncavas em regiões menores convexas que representam as mesmas falhas. As regiões foram divididas através retas auxiliares paralelas as delimitações já utilizadas no triângulo.

A lógica desenvolvida para a consideração de mais de uma região para D2 e DT é formada pelo operador lógico “or” (ou) que adiciona possibilidades para a localização do ponto de falha dentro de mais de um limite.

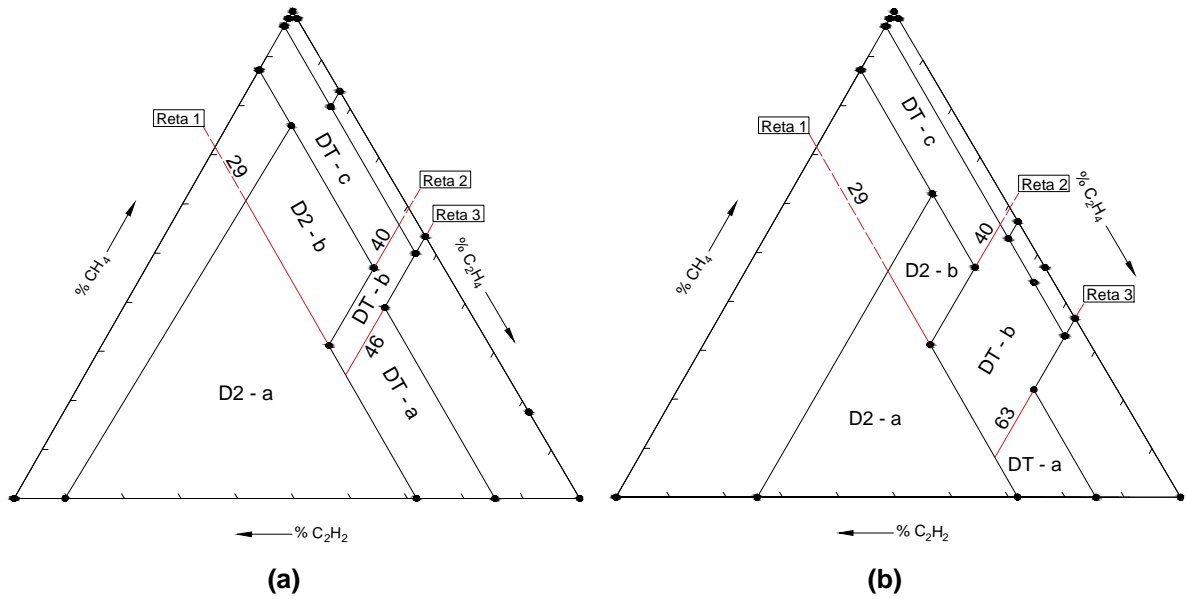
A Figura 13(a) representa através das retas pontilhadas a divisão da região de falha D2 em duas regiões menores e a região DT em três regiões menores para fluido silicone. Os polígonos são nomeados (a, b ou c) com o intuito de facilitar a visualização das áreas que formam a região de falha. As retas pontilhadas na cor vermelha são identificadas com a numeração de 1 a 3 e o valor percentual da aresta de referência.

A Figura 13(b) ilustra as divisões realizadas para as regiões D2 e DT para éster FR3®.

Para o éster BIOTEMP® foram suficientes duas divisões para D2 e duas para DT mostradas na Figura 13(c).

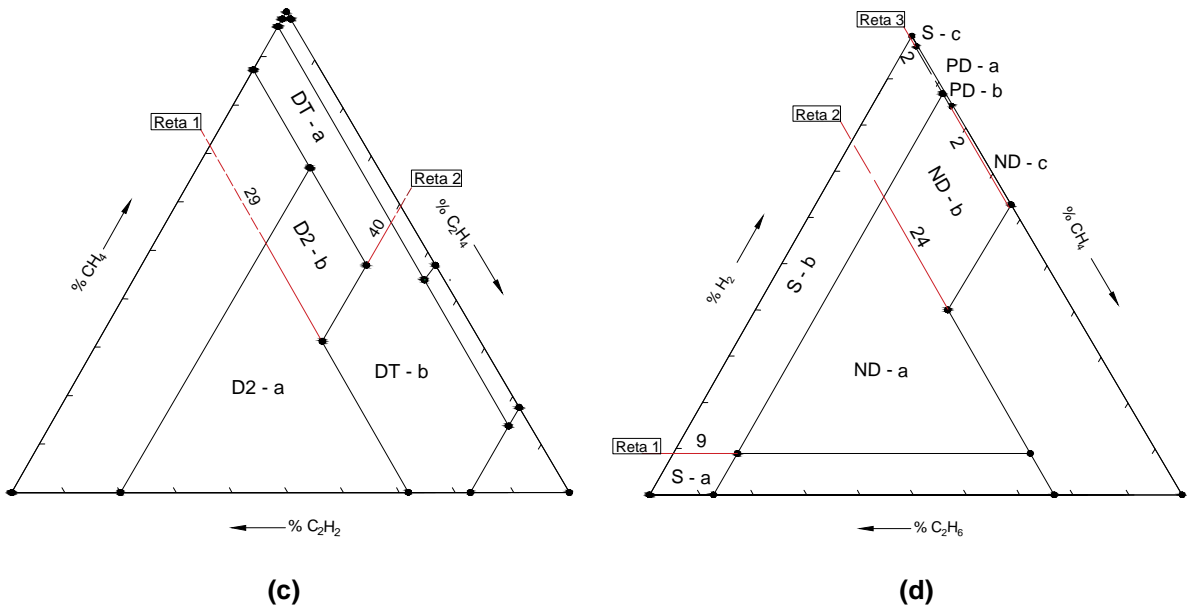
De modo a subdividir o triângulo complementar FR3® foi necessária a divisão das regiões S, PD e ND (Figura 13(d)).

Figura 13(a) - Divisão das regiões D2 e DT óleo silicone e 13(b) - Divisão das regiões D2 e DT éster FR3®



Fonte: Autoria própria.

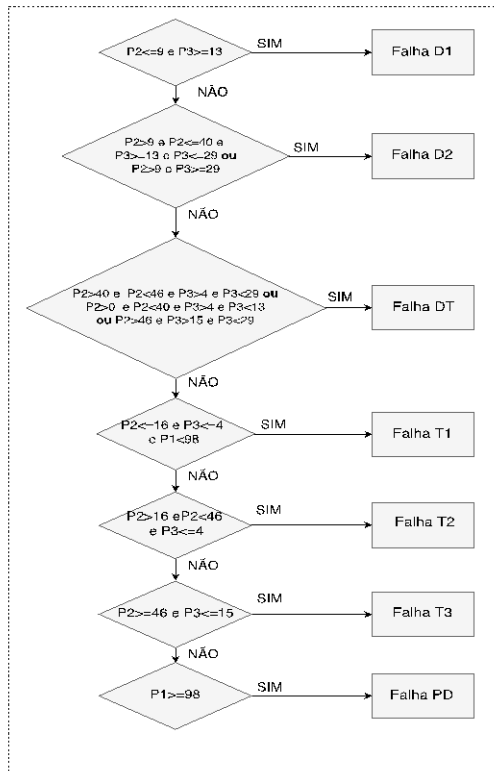
Figura 13(c) - Divisão das regiões D2 e DT éster BIOTEMP® e 13(d) - Divisão das regiões S, PD e ND éster FR3®



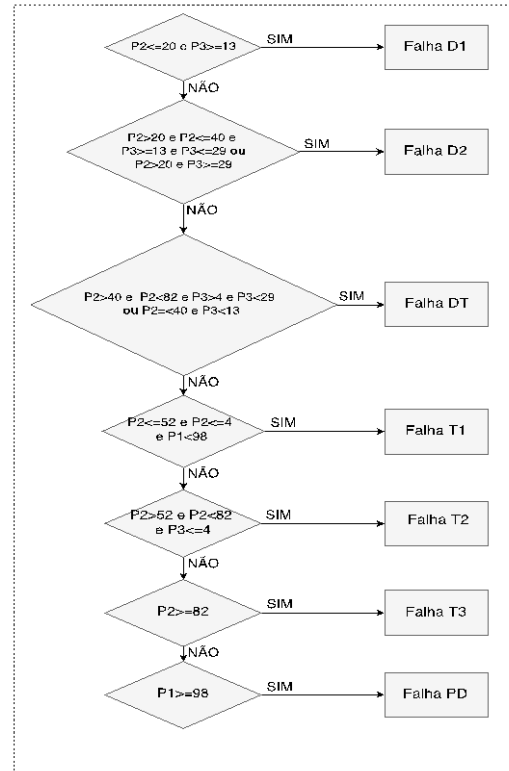
Fonte: Autoria própria.

A lógica para adaptação do Método de Duval e localização do ponto dentre os limites descritos em uma zona de falha é melhor exposta através dos fluxogramas da Figura 14 que apresenta os limites para cada falha.

Figura 14(a) - Fluxograma que representa a lógica para localização de falhas para óleo silicone e 14(b) - Fluxograma que representa a lógica para localização de falhas para éster BIOTEMP®

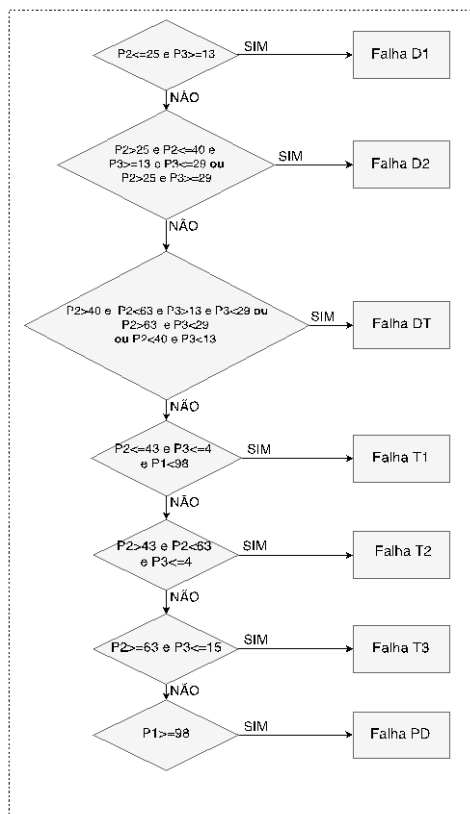


(a)

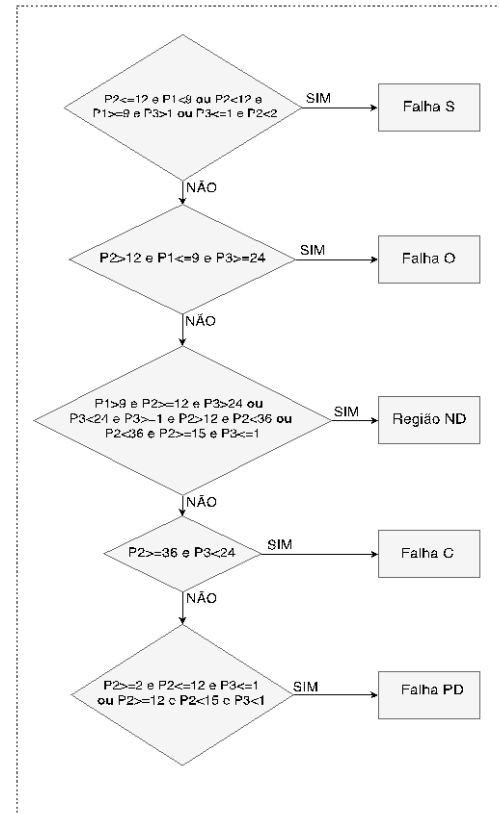


(b)

Figura 14(c) - Fluxograma que representa a lógica para localização de falhas para éster FR3® e 14(d) - Fluxograma para localização de falhas de baixa temperatura em FR3®



(c)



(d)

A lógica descrita é executada no programa principal, indicada na Figura 9 no item “Lógica para identificar falha” sendo executada após a seleção fluido.

No programa principal plota-se o ponto no triângulo de Duval com o intuito de provar o resultado identificado após localização do ponto dentre os limites. Caso o ponto seja situado sobre a fronteira uma das duas falhas é escolhida e recomenda-se acompanhamento periódico do equipamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado da análise realizada no aplicativo será verificado com o intuito de comprovar a eficiência desta ferramenta na aplicação do método bem como a precisão na identificação de falhas incipientes.

Cada um dos triângulos utilizados para os diferentes fluidos alternativos é testado através de comparação com parâmetros de falhas já identificadas na literatura em equipamentos em operação ou através da comparação com o Triângulo de Duval plotado manualmente.

A fim de realizar a discussão de maneira sucinta, apresenta-se nesta seção somente os resultados gráficos ao invés de todas as informações geradas com o aplicativo.

5.1 RESULTADOS PARA ÓLEO SILICONE

Para obtenção dos resultados da análise e localização da falha de forma manual desenvolve-se o método conforme descrito na seção 4.1.1. As concentrações de gases apresentadas na Tabela 10 são simuladas no aplicativo e comparadas com estes resultados.

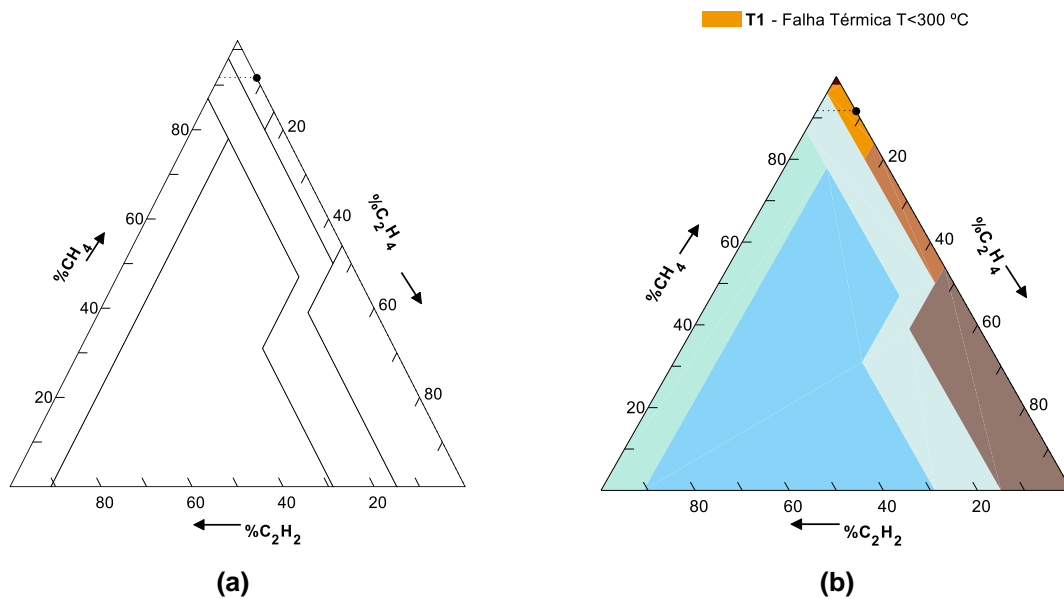
Tabela 10 – Resultados da análise para óleo silicone

Teste	Concentração de gases			Falhas Identificadas	
	CH ₄ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)	C ₂ H ₂ (ppm)	Manualmente	Simulação
A	200	18	0	T1	T1
B	80	35	0	T2	T2
C	38	12	50	D2	D2

Fonte: Aatoria própria.

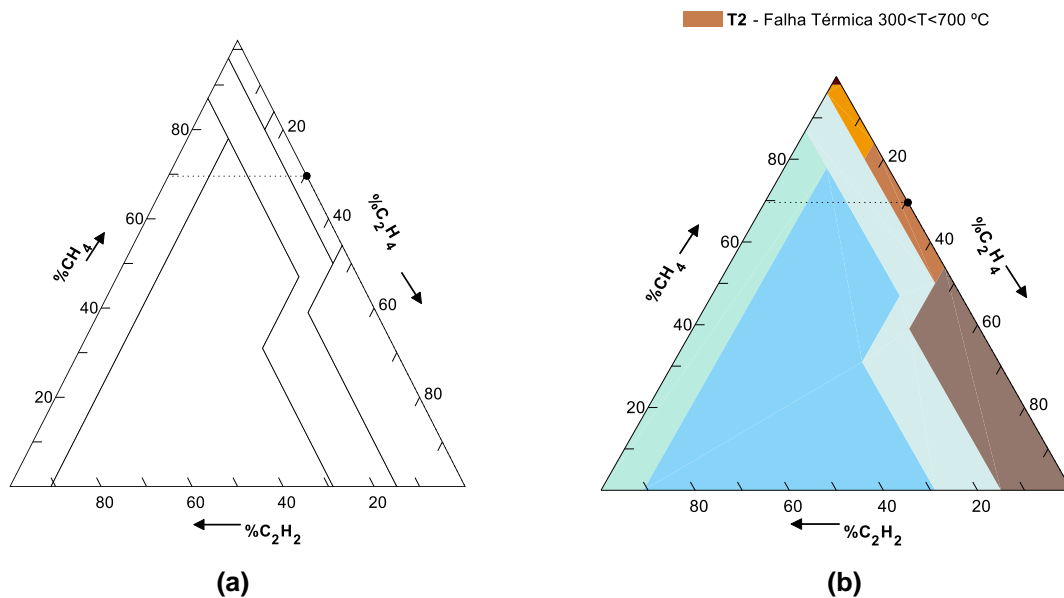
Os resultados gráficos dos testes são apresentados nas Figuras 15, 16 e 17 sendo possível verificar que as mesmas falhas são identificadas tanto para o teste manual quanto para a simulação.

Figura 15(a) - Teste A: Identificação da falha T1 manualmente e 15(b) – Identificação da falha T1 através da simulação



Fonte: Autoria própria.

Figura 16(a) - Teste B: Identificação da falha T2 manualmente e 16(b) - Identificação da falha T2 através da simulação



Fonte: Autoria própria.

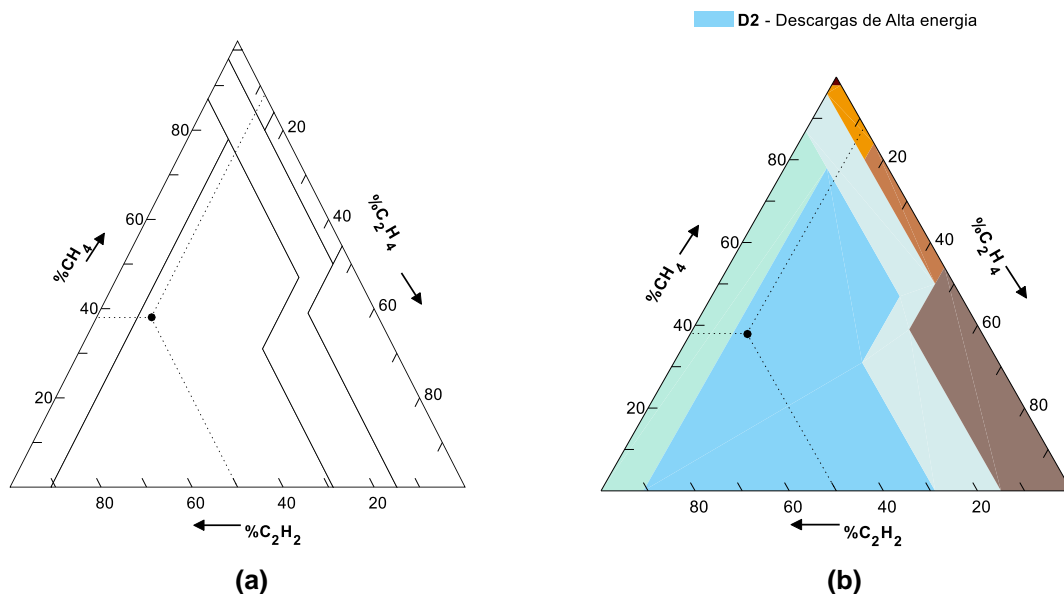
Com o intuito de comparar o desempenho deste aplicativo com a ferramenta desenvolvida em Barbosa (2016), bem como exemplificar as diferenças na análise de fluidos alternativos, o Teste C realizado nessa seção utiliza as mesmas concentrações de gases utilizados na análise em óleo mineral ($CH_4=38$, $C_2H_2=12$ e

$C_2H_4=50$). Para tais concentrações, a falha ocorrente em OM identificada é a do tipo D1 – Descargas de Baixa Energia (DUVAL, DUKARM, 2005).

O teste realizado resulta em um ponto plotado na mesma localização do Triângulo de Duval tradicional por serem utilizadas as mesmas concentrações para OS e OM. Entretanto a falha diagnosticada é do tipo D2 – Descargas de Alta Energia.

Como exposto na Figura 17, o resultado ambíguo ilustra as diferentes características físico-químicas do OS em relação ao OM.

Figura 17(a) - Teste C: Identificação da falha D2 manualmente e 17(b) - Identificação da falha D2 através da simulação



Fonte: Autoria própria.

5.2 RESULTADOS PARA ÉSTER FR3®

Como intuito de verificar a precisão no diagnóstico para éster FR3® foram utilizadas concentrações de gases que representam falhas previamente identificadas em transformadores conforme investigado por Li (2012).

As concentrações de gases, suas respectivas falhas e os resultados diagnosticados são expostas na Tabela 11.

Realizou-se ainda a simulação e comparação de resultados para ocorrência de falhas de baixa temperatura em éster FR3®.

Os resultados da simulação aparecem na sequência.

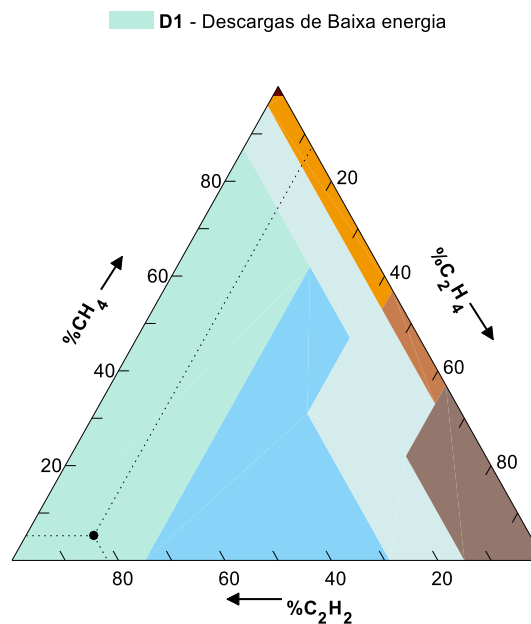
Tabela 11 – Resultados da análise para éster FR3®

Teste	Concentração de gases			Falhas Identificadas	
	CH ₄ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)	C ₂ H ₂ (ppm)	Li (2012)	Simulação
D	14,2	5,8	91,3	D1	D1
E	24,1	2,4	0,4	T1	T1
F	5	0	4,6	T2	T2

Fontes: Li (2012); autoria própria.

Foi realizada o Teste A resultando na identificação da falha D1 - Descargas de baixa energia já conhecida da literatura. O resultado gráfico apresentado pelo aplicativo é mostrado na Figura 18.

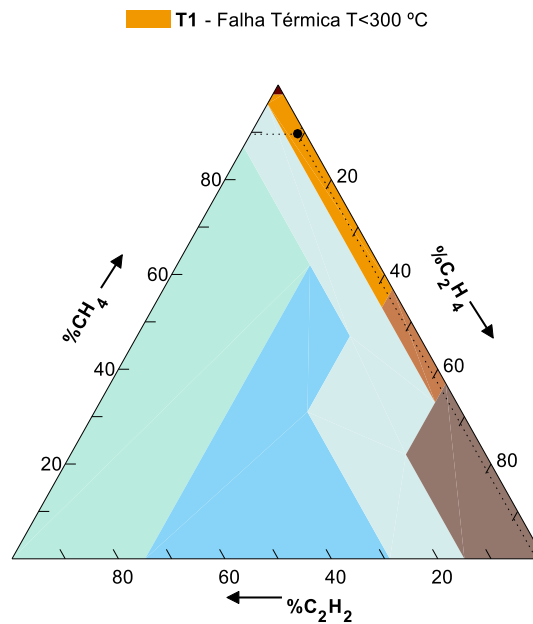
Figura 18 - Teste D: Identificação da falha D1 através da simulação



Fonte: Autoria própria.

O Teste E resultou na identificação pelo aplicativo da ocorrência de falha térmica com temperatura acima de 300°C. A identificação dessa falha condiz com o resultado previamente conhecido para amostra com tais concentrações de gases dissolvidos.

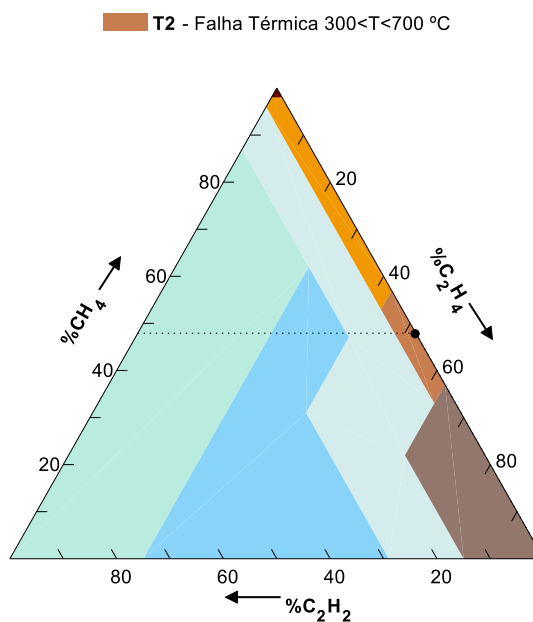
Figura 19 - Teste E: Identificação da falha T1 através da simulação



Fonte: Autoria própria.

O Teste C resultou na identificação de falha térmica T2 com temperatura entre 300°C e 700°C. Essa falha era também previamente conhecida para amostra com a mesma concentração de gases dissolvidos.

Figura 20 - Teste F: Identificação da falha T2 através da simulação



Fonte: Autoria própria.

Devido a necessidade de investigação mais detalhada da ocorrência de *stray gases* em baixas temperaturas, utiliza-se o triângulo complementar (Triângulo de Duval 6) como mencionado na seção 4.1.2.

Para validação desse triângulo no aplicativo foram utilizados resultados de análises cromatográficas e seus resultados estudados em Perrier, *et al*, (2012). A Tabela 12 apresenta os dados utilizados e os resultados obtidos na simulação.

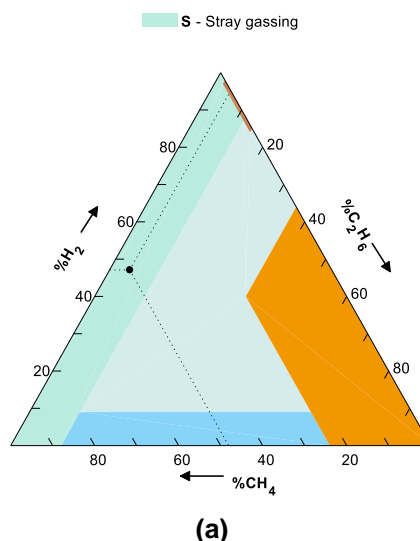
Tabela 12 – Resultados da análise para falhas de baixa temperatura em éster FR3®

Teste	Concentração de gases			Falhas Identificadas	
	CH ₄ (ppm)	H ₂ (ppm)	C ₂ H ₆ (ppm)	Perrier (2012)	Simulação
G	4,8	47,1	48,1	S	S
H	0,8	29,8	69,7	S	S
I	24,1	96,4	120,5	S	S

Fontes: Perrier *et al* (2012); autoria própria.

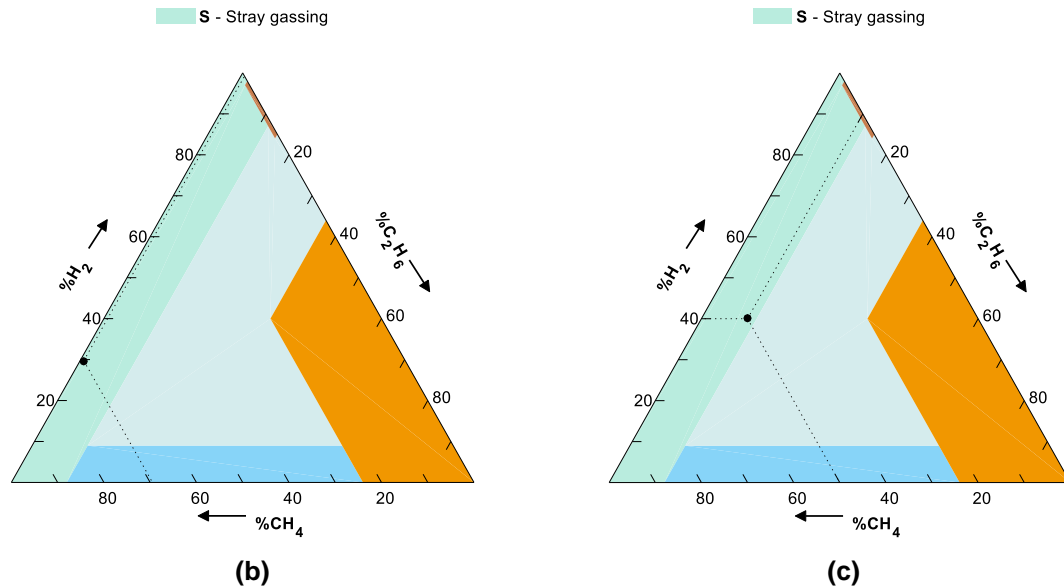
Os resultados gráficos obtidos através do aplicativo são apresentados na Figura 21. Nos Teste G, H e I foram identificadas através da simulação a ocorrência de *stray gassing* (S) que na verdade significa a formação de gases que não necessariamente ocorre devido a falhas no equipamento. Este resultado é o mesmo identificado por Perrier *et al* (2012), onde o material dielétrico foi submetido à temperatura de 120°C por 64 horas.

Figura 21(a) – Resultados obtidos através da simulação: Teste G



Fonte: Autoria própria.

Figura 21(b) – Resultados obtidos através da simulação: Teste H e 21(c) - Resultados obtidos através da simulação: Teste I



Fonte: Autoria própria.

5.3 RESULTADOS PARA ÉSTER BIOTEMP®

A verificação do método foi realizada tendo como base de dados os estudos do fluido BIOTEMP® realizados por Oommen (2002).

Após a simulação foi aplicado o método manualmente para confirmar a identificação da falha de forma apropriada.

A Tabela 13 ilustra as concentrações de gases dissolvidos bem como os resultados obtidos.

Tabela 13 – Resultados da análise para éster BIOTEMP®

Teste	Concentração de gases			Falhas Identificadas	
	CH_4 (ppm)	C_2H_4 (ppm)	C_2H_2 (ppm)	Manualmente	Simulação
F	45	28	40	D2	D2
G	70	38	2	T1	T1
H	5	78	9	T3	T3

Fonte: Autoria própria.

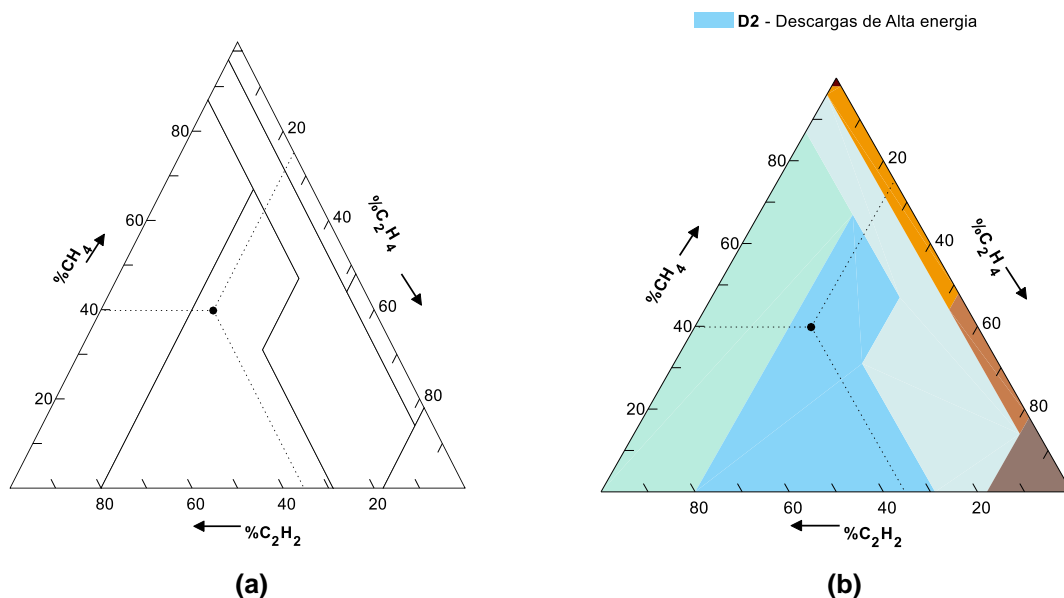
Através dos resultados gráficos identifica-se a ocorrência de D2 – Descargas de alta energia, T1 – Falhas térmicas com temperatura maior que 300°C e T3 - Falhas térmicas com temperatura acima de 700°C, sendo estas as mesmas falhas identificadas manualmente.

Os resultados dos Testes F, G e H são apresentados nas Figuras 22, 23 e 24, respectivamente.

O Teste F simulou concentrações do gás acetileno (C_2H_2) igual a 40% da amostra. Tal ocorrência é explicada por Oommen (2002), de forma que sob condições de arcos elétricos o gás acetileno junto com o hidrogênio é gerado em grandes quantidades tanto para OM quanto para ésteres vegetais.

O resultado pode ser ainda comparado ainda ao obtido por Barbosa (2016) na identificação de falhas através da análise em OM, onde identifica-se a ocorrência da falha D2 em amostra que a concentração de acetileno representa 35% dos gases dissolvidos.

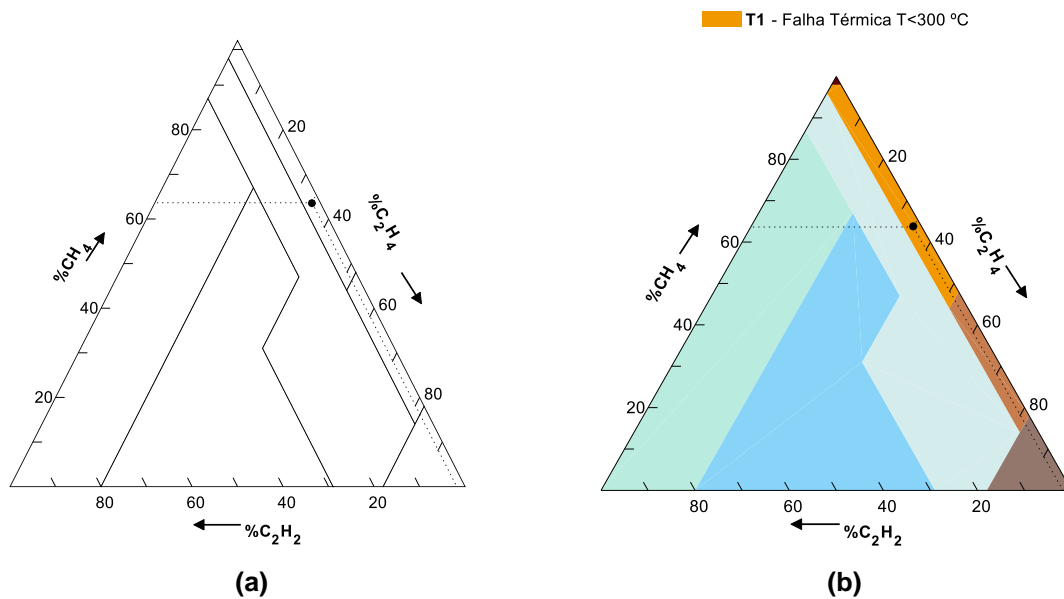
Figura 22(a) - Teste F: Identificação da falha D2 manualmente e 22(b) - Identificação da falha D2 através da simulação



Fonte: Autoria própria.

Os Testes G identifica através da simulação a ocorrência de falha T1. Os resultados obtidos condizem com o demonstrado por Oommen (2002) sendo o gás metano gerado em grandes concentrações para falhas térmicas de baixa temperatura.

Figura 23(a) - Teste G: Identificação da falha T1 manualmente e 23(b) - Identificação da falha T1 através da simulação



Fonte: Autoria própria.

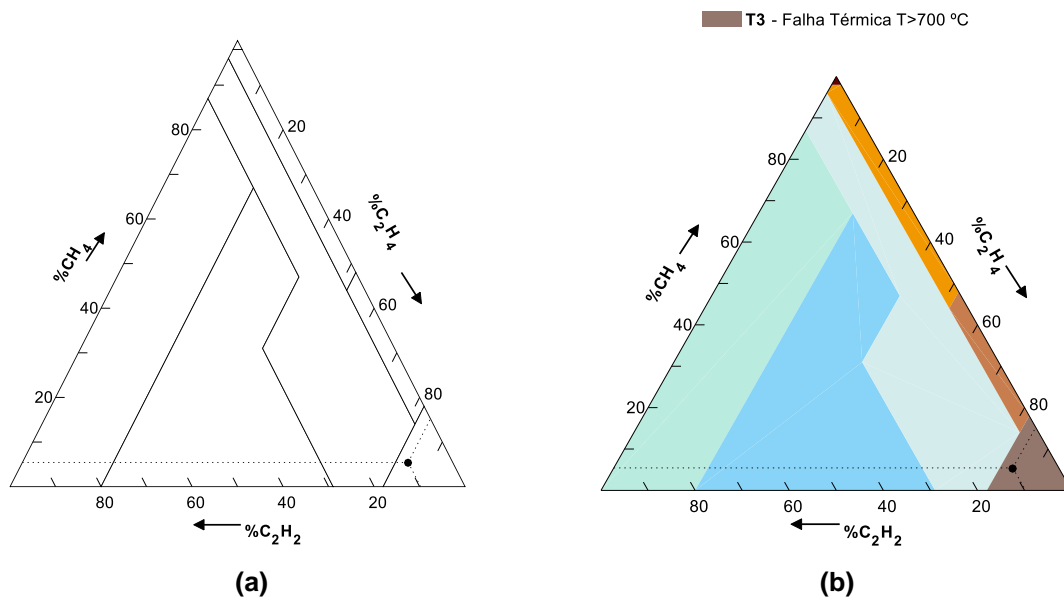
Por fim o Teste H identifica a ocorrência de falha T3 que é a mesma identificada através da aplicação manual do método de Duval.

O resultado é comparado ao obtido pelo aplicativo desenvolvido por Barbosa (2016) para análise de óleo mineral isolante (Figura 19). No estudo citado, simulou-se as concentrações:

- Metano = 20 ppm;
- Etileno = 75 ppm;
- Acetileno = 5 ppm.

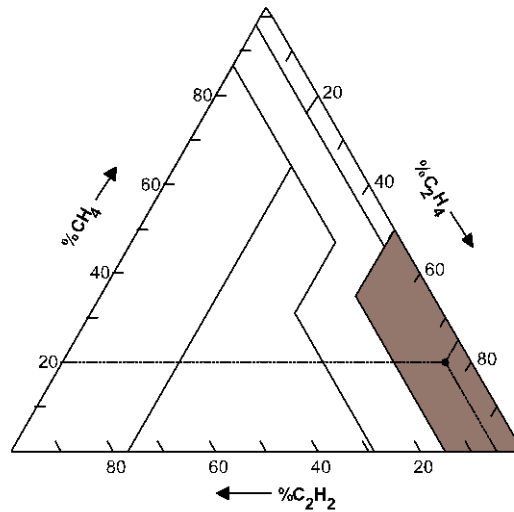
Assim como ocorreu para o éster natural BIOTEMP[®], a falha localizada foi T3, porém em ambos os casos o ponto é localizado em regiões distintas do triângulo como pode ser comparado através das Figura 24.2 e 25. Destaca-se que a região que representa falhas de alta temperatura para BIOTEMP[®] é representada por um polígono diferente do utilizado no triângulo de Duval para OM.

Figura 24(a) - Teste H: Identificação da falha T3 manualmente e 24(b) - Identificação da falha T3 através da simulação



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 - Identificação da falha T3 para óleo mineral



Fonte: Barbosa (2016).

Através da comparação das Figuras 24 e 25 evidencia-se as diferenças nas características físico-químicas e conseqüentemente no estudo do éster natural e óleo mineral como fluido isolante.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo como base o método do triângulo de Duval, foi desenvolvido um aplicativo com o intuito de auxiliar na manutenção preditiva de transformadores, aumentando a vida útil do equipamento e evitando a interrupção do fornecimento de energia elétrica. Através dessa ferramenta adaptada para ésteres alternativos, o usuário é auxiliado na identificação de falhas incipientes.

A interface desenvolvida via MATLAB-GUIDE fornece resultados numéricos e gráficos referentes ao diagnóstico de falhas elétricas e térmicas.

Os resultados obtidos foram comparados com a aplicação manual do método desenvolvido por Michel Duval e com resultados conhecidos para equipamentos em operação apresentados na literatura. Os resultados da simulação são condizentes em ambos identificando as mesmas falhas.

Os resultados foram ainda comparados à análise de óleo mineral isolante, com o intuito de exemplificar as diferenças na aplicação do método para análise de ésteres alternativos.

Com a análise e discussão dos resultados conclui-se que o aplicativo constitui uma ferramenta eficiente e precisa para o estudo de gases dissolvidos em transformadores elétricos.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho aborda a aplicação dos isolantes silicone, BIOTEMP® e Envirotemp FR3®. Existem, outros isolantes que são utilizados na atualidade. Ésteres vegetais feitos a partir de óleo de mamona e babaçu, por exemplo, podem vir a ser utilizados como fluido isolante. Sugere-se que trabalhos futuros desenvolvam a metodologia para outros tipos de ésteres naturais, ésteres sintéticos e misturas de óleo isolante.

Sugere-se ainda o desenvolvimento de metodologia utilizando o Pentágono de Duval, uma ferramenta complementar para interpretação da DGA.

O Pentágono de Duval pode ser utilizado em conjunto com o triângulo para óleo mineral ou óleo não-mineral. Tem o objetivo de fornecer informações complementares, principalmente para o caso de mistura de falhas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL: **Regulamentação dos Requisitos Mínimos de Manutenção e o monitoramento da manutenção de instalações de transmissão de Rede Básica**, Resolução Normativa ANEEL n. 669, 2015.

ALVES, Marco. F. **ABC das Máquinas Eléctricas**. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Departamento de Engenharia Eletrotécnica, 2003.

AMARAL, N. B de Souza. **Estudo sobre critérios para a especificação de transformadores elevadores de estações geradoras (generation step-up transformers)**. 2007. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

AMORA, Márcio. A. B. **Extração de regras interpretáveis para o diagnóstico eficiente de transformadores de potência isolados a óleo a partir do aumento de espaço de atributos**. 2013. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15422: Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5440: Transformadores para redes aéreas de distribuição - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7070: Guia para amostragem de gases e óleo isolante em transformadores e análise dos gases livres e dissolvidos**. Rio de Janeiro, 2006.

BARBOSA, Fábio. R. **Diagnóstico de falhas incipientes a partir das propriedades físico-químicas do óleo isolante em transformadores de potência como método alternativo à análise de gases dissolvidos**. 2013. 131 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

BARBOSA, T. M. **Desenvolvimento de Aplicativo Baseado no Método de Duval para Análise de Gases em Transformadores**. 2016. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

BARTINICAS, R. **Corona Discharge Processes in Voids**. In: Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation. ASTM International, 1979.

BECHARA, Ricardo. **Análise de Falhas em Transformadores de Potência**. 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BENEDET, Mauro E. **Otimização de um analisador de gás dissolvido em óleo de múltiplos transformadores de potência**. 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CAMARGO, J. M. **Estudo do Desempenho Térmico de Transformadores a Seco Alimentando Cargas Não Lineares**. In: XI Encontro Nacional de Instalações Elétricas. São Paulo, 2006.

DUVAL Michel. **The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers**, IEEE Electrical Insulation Magazine, v.24, n. 6, 2008.

DUVAL, M. **Dissolved Gas Analysis and the Duval Triangle**. In: AVO New Zeland International Technical Conference, 2006.

DUVAL, Michel. **DGA in Non-Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria**. Paris, France: CIGRÉ, 2010.

DUVAL, Michel. **A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformer**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 18, n. 3, p. 8-17, 2002.

DUVAL, Michel et al. **Interpretation of Gas-In-Oil Analysis Using New IEC**. Publication 60599 and IEC TC 10 Databases. IEEE Electrical Insulation Magazine, [S.], v.17, n. 2, p. 31-41, 2001.

DUVAL, Michel; DUKARM, J. **Improving the Reliability of Transformer Gas-in-Oil Diagnosis**. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol.21, no.4, pp. 21–27, 2005.

GUEDES, Manuel V. **Máquinas Elétricas I – apontamentos**. Porto, Portugal: Universidade do Porto, 2003.

HEADQUARTERS, DEPARTMENT OF THE ARMY. **Technical Manual: Power Transformer Maintenance and Acceptance Testing**. TM 5-686 Technical Manual. Washington, DC, USA, 16 November, 1998.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **IEEE Guide for Interpretation of Gases Generated in Natural Ester and Synthetic Ester-Immersed Transformers**, IEEE Standard C57.155-2014, Nov. 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **IEEE Std C57 Guide for the interpretation of Gases Generated in Oil – Immersed**

Transformers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York/NY: 1991.

JAYME, L.; NUNES, Jr. **O Óleo Isolante do Ponto de Vista Químico.** In: IV SEMEL – Seminário de Materiais do Setor Elétrico. Curitiba, 1994.

KULKARNI, Shrikrishna V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer engineering: design and practice.** CRC Press, 2004.

LEONARD, W. K. E. **Trasformatori di Potenza.** Laureando Ingegneria Elettrotecnica. Facoltà Di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria Elettrica. Università Degli Studi di Padova. Padova, Italia, 2010.

LI, S. **Study of Dissolved Gase Analysis under Electrical and Thermal Stresses for Natural Esters used in Power Transformers.** 2012. 176 f. Dissertação (Mestrado em engenharia e ciências) – University of Manchester, Manchester, Reino Unido, 2012.

LUZ JÚNIOR, Geraldo Eduardo; NETO, João Mariz Guimarães; NETO, José Machado Moita. **Ação adsorvente da bauxita sobre óleo isolante novo.** Química Nova, Teresina, v. 28, n. 3, p.535-538, 2005.

MARTINS, Alvaro JAL; SILVA, Neynard A. **As vantagens da revitalização de transformadores de potência utilizando repotenciação e óleo vegetal.** Anais do Seminário Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE, 2006.

MCSHANE C. P. **Natural and synthetic ester dielectric fluids: their relative environmental, fire safety, and electrical performance.** In: Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 1999 IEEE. IEEE, 1999. p. 8 pp.

MCSHANE C. Patrick. et al. **Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid.** In: Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES. IEEE, 2001. p.675-679.

MILASCH, Milan. **Manutenção de transformadores em líquidos isolante.** São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

NOGUEIRA, César. A. A. **Avaliação de sistemas de medição da concentração de hidrogênio dissolvido em óleo isolante.** 2004. 83 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

OOMMEN, T. V. **Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers.** IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 18, n. 1, p. 6-11, 2002.

PAIXÃO, Luis. A. **Avaliação da qualidade do óleo em transformadores com o emprego da função discriminante quadrática**. 2006. 268f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, 2006.

PERRIER, C. MARUGAN, M. BEROUAL, A. **DGA Comparasion Between Ester and Mineral Oils**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 19, n. 5, 2012.

RECLAMATION. **Transformers: Basics, Maintenance and Diagnostics**, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. Denver, Colorado, USA, April 2005.

SILVA, Cláudia. R. **Propriedades Físico Químicas e Dielétricas de Óleos Vegetais Para Uso Como Isolante em Transformadores**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2009.

STOCCO, Mônica Bufara Cecato. **Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluidos isolantes em transformadores de distribuição da rede elétrica**. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

TENBOHLEN, Stefan; KOCH, Maik., **Aging performance and moisture solubility of vegetable oils for Power Transformers**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 25, n. 2, p. 825-830, 2010.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM-Planejamento e Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, 2002.

WANG, Zhongdong et al. **Dissolved gas analysis of alternative fluids for power transformers**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v.23, n. 5, p. 5-14 2007.

WILHELM, H. M. et al. **Aspectos Relacionados com a Utilização de OVI no Brasil**. In: Anais do IV WORKSPOT-International Workshop on Power Transformers, Recife-PE. 2006.

ZIRBES, Roberto; ROLIM, Jacqueline G.; ZÜRN, Hans Helmut. **Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado de Isolamentos de Papel Impregnado com Óleo Mineral**. SBA Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica. v. 16, n. 3, p. 318-331, 2005.

