



## Proposição e Validação de Soluções Computacionais para Detecção de Falhas em Transformadores de Potência Baseadas no Pentágono de Duval\*

Proposition and Validation of Computational Solutions for Fault Detection in Power Transformers Based on the Duval Pentagon

Daniel Schlickmann Bastos<sup>1</sup>  
Ian Rodrigues de Castro Silva<sup>2</sup>  
Sabine Madsen Ficker<sup>3</sup>  
Maury Meirelles Gouvêa Júnior<sup>4</sup>  
Magali Rezende Gouvêa Meireles<sup>5</sup>

### Resumo

Transformadores de potência são utilizados em subestações de sistemas elétricos para transmissão e distribuição de energia elétrica entre os geradores e os consumidores finais. Sistemas eficientes de isolamento e refrigeração proporcionados por óleo isolante são fundamentais para que o transformador opere adequadamente. Durante a operação do transformador, o óleo isolante pode ter alterações nas concentrações de gases dissolvidos decorrentes de descargas elétricas ou térmicas, sendo que o acompanhamento e o monitoramento da proporção desses gases garantem a saúde dos transformadores. Dentre os métodos utilizados para esta análise e delimitação de falhas, há o Pentágono de Duval. A expectativa dos autores é que a implementação de um algoritmo, objetivo do presente trabalho, auxilie na interpretação do Pentágono de Duval, contribuindo para a análise de dados e para a intervenção preventiva no caso de falha detectada. Um experimento comparativo foi realizado, utilizando-se Redes Neurais Artificiais. O método proposto fornece uma identificação direta da falha, correspondente às proporções de gases presentes em uma amostra do óleo isolante de um transformador em análise.

**Palavras-chave:** Pentágono de Duval. DGA. Análise de gases dissolvidos. Transformador de potência.

\*Submetido em 09/05/2024 - Aceito em 14/11/2024

<sup>1</sup>Graduado em Ciência da Computação pela PUC Minas, Brasil – daniel.bastos1710@gmail.com

<sup>2</sup>Graduado em Sistemas de Informação pela PUC Minas, Brasil – ianrcsd@gmail.com

<sup>3</sup>Graduada em Sistemas de Informação pela PUC Minas, Brasil – sabineufmg@yahoo.com.br

<sup>4</sup>Doutor em Ciência da Computação pela UFPE, Brasil – maury@pucminas.br

<sup>5</sup>Doutora em Ciência da Informação pela UFMG, Brasil – magali@pucminas.br

### Abstract

Power transformers are used in substations of electrical power systems for transmission and distribution of electricity between generators and end consumers. Efficient insulation and cooling systems provided by insulating oil are essential for a transformer operates properly. During transformer operation, insulating oil can have changes in dissolved gas concentrations resulting from thermal or electrical discharges and the follow-up and monitoring of the proportion of these gases guarantee the transformer health. Among the methods used for this analysis and delimitation of faults, there is Duval Pentagon. The authors hope that the implementation of the algorithm, the aim of this work, will help in the interpretation of the Duval Pentagon, contributing to data analysis and preventive intervention in the event of a detected fault. A comparative experiment was carried out using Artificial Neural Networks. The proposed methods provides a direct identification of the fault, corresponding to the proportions of gases present in a sample of the insulating oil of a transformer under analysis.

**Keywords:** Duval Pentagon. DGA. Dissolved gas analysis. Power transformer.

## 1 INTRODUÇÃO

Em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica, os transformadores de potência podem ser considerados como o coração da subestação de energia elétrica, viabilizando o fornecimento desse recurso para todo o sistema elétrico. Sem o uso dos transformadores, não seria viável transmitir a energia gerada nas usinas. Assim, o transformador de potência é um dos dispositivos mais importantes para o fornecimento de eletricidade aos consumidores (BUSTAMANTE et al., 2019). Falhas ou defeitos podem causar problemas operacionais ou até de inatividade no fornecimento de energia, causando significativas perdas econômicas ou até mesmo de recursos (WONG et al., 2022). Em 3 de novembro de 2020, por exemplo, ocorreu a interrupção de aproximadamente 95% do total das cargas da região do Amapá, devido a um incêndio em transformador que resultou em sua perda total. Cerca de 800 mil pessoas ficaram sem energia elétrica por 22 dias (ONS, 2020).

Para o funcionamento adequado, sistemas eficientes de isolamento e de refrigeração são fundamentais, sendo, geralmente, utilizados em seu interior, óleo isolante e papel (VARAN; YURTSEVER, 2018). O desempenho confiável e o contínuo fornecimento de energia elétrica podem ser garantidos com o acompanhamento e a manutenção preventiva desses ativos, na qual a Análise de Gases Dissolvidos (DGA, em inglês, *Dissolved Gas Analysis*) é uma das alternativas mais empregadas para monitoramento (CHRISTINA et al., 2018). A concentração de gases dissolvidos e a proporção entre eles são índices importantes para julgar a condição de saúde dos transformadores (BINDER, 2014).

Os métodos de Triângulo de Duval e Pentágono de Duval são os mais utilizados para a realização dessa análise dos gases dissolvidos (DENG et al., 2019). Inicialmente, os triângulos 1, 4 e 5 de Duval são empregados para delimitação inicial das falhas e, posteriormente, o diagnóstico diferencial é obtido pelo método do Pentágono de Duval, utilizando-se os Pentágonos 1 e 2. Por meio das regiões dos Pentágonos, ocorre uma delimitação do tipo de falha que produziu o padrão de gases identificado (IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers, 2019). Entretanto, a análise da proporção dos gases produzidos não é um processo trivial e contribuições computacionais para a interpretação dos dados são de grande relevância aos interessados em garantir a manutenção dos transformadores (BINDER, 2014).

Assim, a construção e a implementação de algoritmos que auxiliem a interpretação de concentrações de gases em óleo isolante poderá amparar a construção de *dashboards* que forneçam imediata análise dos dados. Esse processo facilita a interpretação direta, acelerando o processo de intervenção preventiva, proporcional à falha detectada.

Frente a tal perspectiva, este trabalho possui como objetivo geral a implementação de algoritmos que auxiliem na detecção do tipo de falhas em transformadores de potência a partir do método de Pentágono de Duval. Para a realização de tal objetivo geral, inicialmente, foi realizada uma busca por maiores detalhamentos do método de Pentágono de Duval e apropriação do processo de interpretação da proporção dos gases dissolvidos. Por meio de tal fundamentação, como objetivos específicos, foram desenvolvidos algoritmos em Java. A informação relativa à

concentração de gases dissolvidos no óleo isolante dos transformadores foi utilizada como entrada. Duas informações relevantes foram obtidas como saída. Uma delas é a descrição direta de qual falha corresponde a uma dada proporção de gases. A outra informação gerada é uma orientação cartesiana do ponto de leitura referente a essa falha, para que seja viável sua localização diretamente sobre uma figura do Pentágono de Duval. Para validar a execução do código, foram realizados testes e experimentos comparativos, utilizando redes neurais artificiais.

A próxima seção apresenta o referencial teórico, no qual há uma contextualização do tema ao se apresentar um pouco sobre os transformadores de potência e óleo isolante, manutenção em transformadores e o estudo de falhas, a análise dos gases dissolvidos no óleo isolante e o método do Pentágono de Duval. A Seção 3 apresenta alguns trabalhos correlacionados ao presente trabalho. A Seção 4 descreve os procedimentos metodológicos. A Seção 5 analisa os resultados obtidos com a execução do algoritmos e a comparação dos resultados com os gerados por um sistema de classificação utilizando Redes Neurais Artificiais. A Seção 6 discute as considerações finais.

## **2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA**

A seguir, são abordados temas relacionados ao presente trabalho tais como os transformadores, seu funcionamento, manutenção e modos de detecção de falhas para que seja possível uma contextualização e do tema.

### **2.1 Transformadores de potência e óleo isolante**

Transformadores de potência, que podem ser vistos na Figura 1, são utilizados em subestações elétricas, recebendo a energia gerada em usinas fotovoltaicas, eólicas, hidrelétricas, dentre outras. Internamente ao transformador, essa energia é então transferida entre circuitos pelo uso de indução eletromagnética, para posterior transmissão e distribuição (LATA; VADHERA, 2017). Sistemas eficientes de isolamento e refrigeração são fundamentais para que o transformador opere adequadamente, sendo utilizados, geralmente, óleo isolante e papel do tipo “Kraft” (CAMPOS FILHO, 2017).

Segundo Rodiah et al. (2018), no caso de transformadores de potência, o óleo isolante utilizado precisa possuir duas características fundamentais: (1) alta condutividade térmica, absorvendo o calor gerado pelo núcleo de ferro e (2) grande rigidez dielétrica, suportando alta tensão e evitando o curto-circuito. O óleo atua, então, como um isolante elétrico e, usado em conjunto com papel, atua como um meio dielétrico em equipamentos de alta tensão (RAFIQ et al., 2015).

Ao longo da operação do transformador, o óleo isolante sofre um processo de envelhecimento resultante de ações térmica, elétrica e de outros materiais presentes no equipamento, tais como oxigênio e cobre. Consequentemente, há uma deterioração das propriedades isolantes do óleo e, em alguns casos, também há degradação da celulose (PAIXÃO, 2006).

**Figura 1 – Transformador de potência**



Fonte: (SANERGRID, 2022) .

## 2.2 Manutenção em transformadores e o estudo de falhas

O acompanhamento e o conhecimento das condições de operação dos transformadores de potência em subestações são de significativa relevância para o setor elétrico. O conhecimento de falhas juntamente com delimitação de sua gravidade precisam ser conhecidos para que o transformador seja desligado apenas quando for realmente necessário. Segundo Lata e Vadhera (2017), o método DGA é efetivo tanto para descobrir uma possível falha e intervenções preventivas, assim como para auxiliar na delimitação de necessidade efetiva de desligamento do transformador.

Vários são os métodos utilizados como suporte à detecção de falhas em transformadores e, de acordo com Christina et al. (2018), os que fornecem os resultados mais significativos, além de serem os mais populares e importantes em comparação com os outros métodos são: a análise de gases dissolvidos, a tensão de ruptura e a análise de furfural. Bustamante et al. (2019) ressaltam que a análise dos gases dissolvidos no óleo do transformador é um dos parâmetros mais importantes na avaliação do estado de saúde de transformadores de potência.

## 2.3 Análise de Gases Dissolvidos

Sob condições anormais, como tensões térmicas ou elétricas, o óleo isolante de transformadores de potência sofre decomposição, liberando diferentes proporções de gases que são diretamente relacionadas ao tipo de tensões sofridas. A concentração dos gases dissolvidos e

a proporção entre os diferentes gases são índices importantes no julgamento da condição dos transformadores de potência (YU et al., 2022). O método DGA envolve, então, a análise desses gases dissolvidos de modo a detectar qual o tipo de falha e o grau de polimerização, avaliando a taxa de deterioração e o índice de saúde do transformador. A precisão do método é apontada por Singh et al. (2019) como 98,13% para eventos de falha.

Dentre os métodos DGA, segundo Aciu et al. (2021), os métodos criados por Michel Duval podem ser usados com alta porcentagem de predições corretas comparados com outros métodos clássicos, uma vez que permitem a identificação de seis tipos de falhas básicas, além de quatro sub-tipos de falhas térmicas que fornecem informações adicionais relevantes. Essas falhas são detalhadas na Seção 2.4.

## 2.4 Pentágonos de Duval

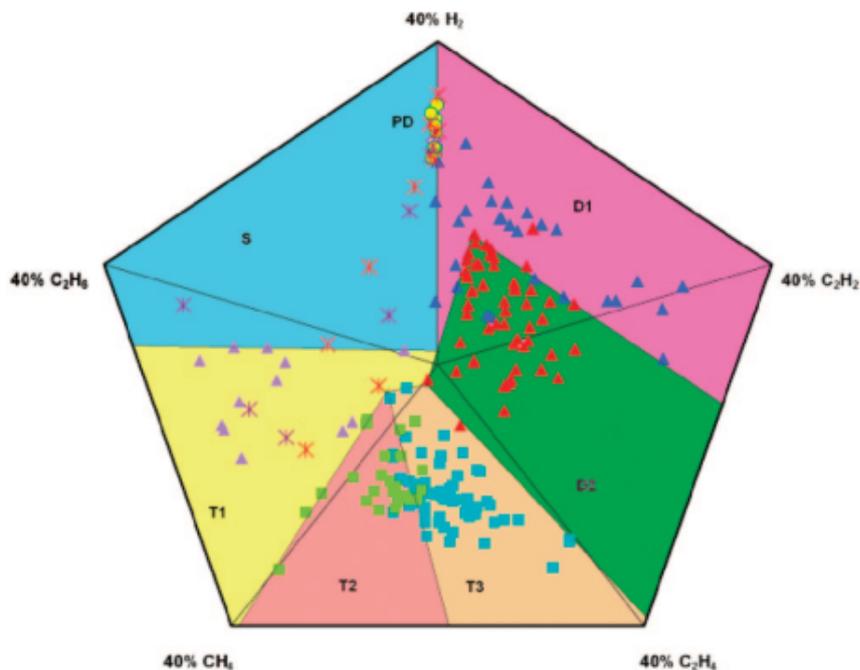
Os Pentágonos 1 e 2 de Duval são utilizados como complementares na delimitação de falhas detectadas previamente pelo uso dos Triângulos. Esses métodos gráficos são detalhados tanto no *Conseil International des Grands Réseaux Electriques* (CIGRE), quanto no Guia de Gases da IEEE (*Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers*, 2019). Mais especificamente, segundo Duval e Buchacz (2022), os dois pentágonos gráficos foram publicados no *IEEE Electrical Insulation Magazine* (DUVAL; LAMARRE, 2014) como complementares às leituras realizadas pelos Triângulos 1, 4 e 5 desenvolvidos previamente (DUVAL, 2016).

No presente trabalho, são elaborados algoritmos para interpretação dos pentágonos, uma vez que o mecanismo para elaboração e interpretação dos triângulos já se encontra bem delimitado (CAMPOS FILHO, 2017; DUVAL, 2002), facilitando sua implementação tanto pela disponibilidade de material já publicado quanto por demandar uma codificação mais simples do que para os pentágonos.

Os pentágonos possibilitam uma fácil identificação dos padrões de formação de gases no óleo isolante dos transformadores, após análise prévia pelos triângulos (CHEIM et al., 2020). Por meio das regiões dos pentágonos, ocorre uma delimitação do tipo de falha que produziu o padrão de gases identificado. Como pode ser observado na Figura 2, as regiões delimitadas por diferentes cores, no pentágono, correspondem aos seis tipos básicos de falhas térmicas ou elétricas que geram processos de decomposição do óleo isolante. Para definir essas regiões no pentágono, várias amostras de DGA, de transformadores que apresentavam alguma alteração, passaram por inspeção visual interna para identificação de eventual falha térmica, elétrica ou uma associação de ambas. Os pontos individuais na Figura 2 correspondem a esses resultados DGA que foram identificados por inspeção visual, fundamentando a relação entre os dados obtidos da análise dos gases dissolvidos com a constatação presencial das falhas e gerando as delimitações das regiões de falhas no pentágono, segundo Duval e Lamarre (2014). A Tabela 1 apresenta as regiões delimitadas. A região S, correspondente ao gaseamento disperso do óleo, está associada a um pequeno estresse térmico, mas não correspondente a partes ativas ou prin-

cipais do transformador (DUVAL; BUCHACZ, 2022). As falhas mais severas correspondem à descarga de energia, seguidas das falhas térmicas, enquanto a região S não representa risco significativo à saúde do transformador (IRUNGU; AKUMU, 2021).

**Figura 2 – Pentágono 1 de Duval**



**Resultados DGA identificados por inspeção visual, associados às falhas:**

● PD ▲ D1 ▲ D2 ■ T3 ■ T2 ✕ S>200°C ✕ S-120°C ▲ T1

Fonte: (DUVAL; LAMARRE, 2014).

**Tabela 1 – Regiões de falhas do Pentágono de Duval**

Região	Cor	Descrição da falha
PD	Amarelo	Descarga parcial do tipo corona
D1	Rosa	Descarga de baixa energia
D2	Verde	Descarga de alta energia
T1	Amarelo	Falhas de temperaturas abaixo de 300° C
T2	Laranja	Falhas de temperaturas entre 300° C e 700° C
T3	Laranja claro	Falhas de temperaturas acima de 700° C
S	Azul	Gaseamento disperso do óleo

Fonte: Autores.

Cheim et al. (2020) apresentam os passos necessários para a plotagem, no Pentágono de Duval, das leituras de gases realizadas e a delimitação das regiões correspondentes às falhas. Como, neste trabalho, são elaborados os algoritmos correspondentes aos passos descritos por estes autores, cada etapa é detalhada de forma estruturada na Metodologia.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Com o objetivo de entender e explorar as alternativas de automação das técnicas elaboradas por Duval, foram considerados alguns trabalhos. O primeiro aborda uma aplicação desenvolvida pela *SAP Predictive Maintenance and Service* (SAP-APPLICATION-HELP, 2022). O segundo trabalho (HOSSEINI et al., 2020) apresenta uma proposta de implementação a partir dos triângulos de Duval. O terceiro (HU et al., 2020) sugere uma implementação de identificação de falha de forma automatizada, baseada no Pentágono de Duval de modo similar ao que está sendo proposto neste trabalho, mas utilizando outra implementação. E, por último, tem-se o próprio trabalho do Duval e colaboradores (CHEIM et al., 2020), onde há a delimitação de como deve ser utilizado o método do Pentágono de Duval, com detalhamento das etapas e cálculos a serem percorridos até a obtenção das leituras. Esse último trabalho foi a principal referência para a fundamentação da construção dos códigos relacionados às propostas de implementação deste artigo.

Quanto ao primeiro trabalho relacionado, citado no parágrafo anterior, segundo a *SAP-Application-Help* (2022), a *SAP Predictive Maintenance and Service* apresenta um *software* que mantém os ativos em execução prevendo, simulando e otimizando sua integridade. A análise da qualidade do óleo de transformadores pode ser monitorada pela visualização de um centro de controle da saúde do ativo (*AHCC - Asset Health Control Center*), no qual as leituras sobre os triângulos e pentágonos de Duval, assim como as porcentagens de cada gás podem ser acompanhadas. Entretanto, o aplicativo não viabiliza a edição do *dashboard* pelo usuário, além de poder induzir ao erro de interpretação por profissional não qualificado, uma vez que a interface para o usuário, que é disponibilizada, possibilita a interpretação concomitante dos triângulos e pentágonos. A interpretação dos gráficos de Duval precisa seguir uma definição do conjunto de gráficos a serem considerados em cada situação (DUVAL, 2016) para uma adequada análise da proporção de gases produzida. Assim, o uso de tal ferramenta fica condicionado à interpretação por um profissional qualificado. Outro fator limitante do uso do referido *software* diz respeito ao alto custo de contratação da ferramenta, inviabilizando sua utilização por empresas onde há limitação de recursos. Por outro lado, possui uma apresentação gráfica agradável e de fácil manipulação, podendo servir de referencial para uma construção similar de interface para o usuário, como pode ser observado na Figura 3.

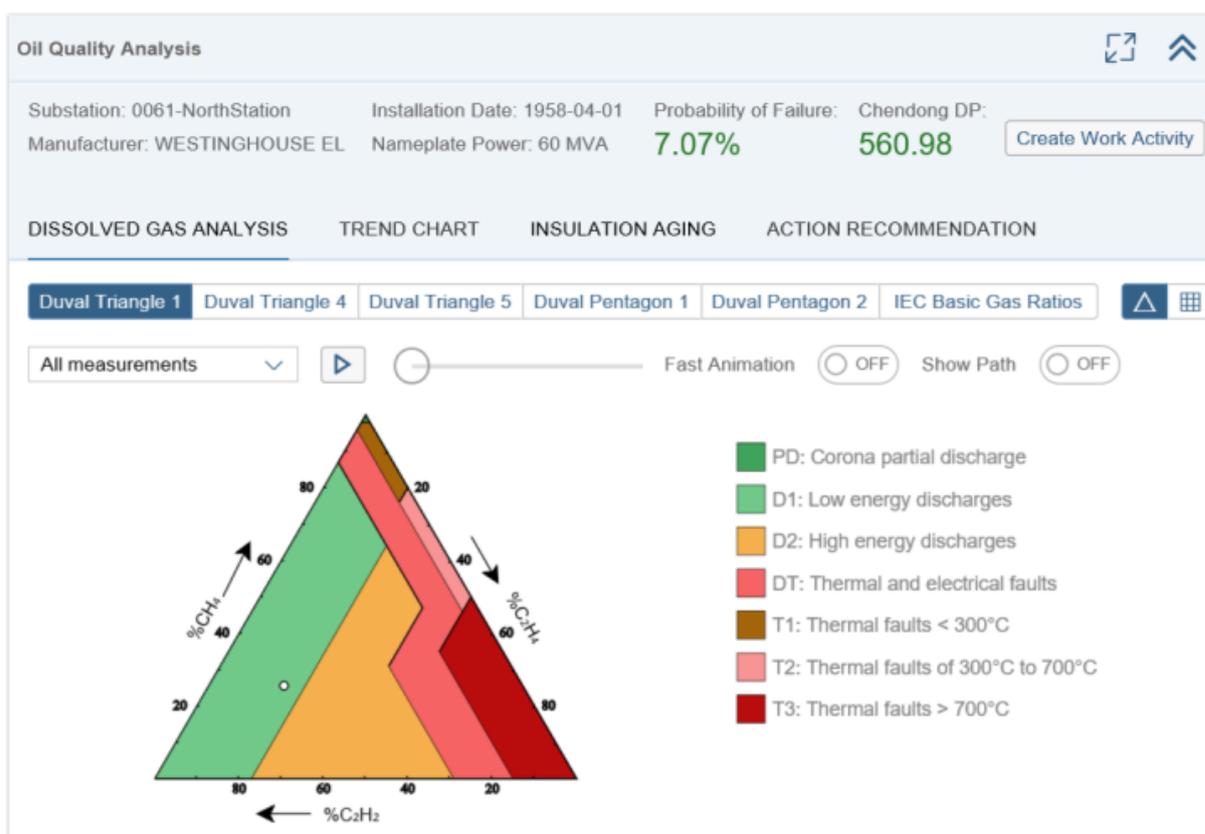
Uma outra proposta de construção de um sistema automatizado de análise de gás dissolvido foi apresentada por Hosseini et al. (2020), contemplando, entretanto, somente os Triângulos de Duval e o método de Rogers. Os autores sugerem um acompanhamento das mudanças relativas nos níveis dos gases ao longo de um determinado intervalo de tempo para melhorar a sensibilidade de delimitação de possíveis falhas. Tal medida pode ser de difícil implementação de forma automatizada, pois o intervalo de tempo relevante varia contextualmente. O uso de tais metodologias auxiliam na delimitação inicial da saúde do transformador e direcionamento para a necessidade ou não de outras análises, como por exemplo dos Pentágonos 1 e 2 de Duval.

Já um programa desenvolvido por Hu et al. (2020) permite a identificação automática da falha em transformador a partir do método de Pentágono de Duval, além de oferecer um fluxo-

grama com as condições que indicam a anormalidade dos resultados de DGA para ser aplicado anteriormente à aplicação do método de Pentágono de Duval. Entretanto, apesar de tal artigo indicar a viabilidade de automatização do processo de análise das falhas em transformadores, não é fornecido acesso ao código ou informações para a transposição para a interface do usuário.

Tanto Hu et al. (2020), quanto Cheim et al. (2020) possibilitam uma boa descrição do uso do método de Pentágono de Duval e dos parâmetros necessários para a elaboração dos algoritmos.

**Figura 3 – Dashboard da SAP**



Fonte: (SAP-APPLICATION-HELP, 2022).

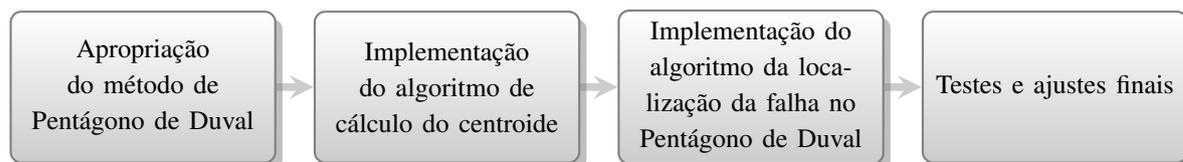
#### 4 METODOLOGIA

O presente trabalho constitui-se de uma pesquisa aplicada, na qual conhecimentos construídos por Michel Duval sobre as falhas em transformadores de potência foram aplicados na construção de algoritmos que auxiliam na interpretação dos dados fornecidos pelo usuário.

A Figura 4 apresenta um fluxograma geral da metodologia utilizada no presente trabalho. Inicialmente, uma ‘Apropriação do método de Pentágono de Duval’ foi essencial para um entendimento do método e elaboração de um código que executasse, passo a passo, os cálculos propostos por Duval, permitindo a ‘Implementação do algoritmo de cálculo do centroide’, con-

forme apresentado na Figura 4. O cálculo do centroide gera dois valores, as coordenadas x e y, que foram, então, utilizadas para localizar essa leitura da amostra sobre o Pentágono de Duval, que contém as regiões representativas de causas de falhas em transformadores. Tal etapa foi representada no fluxograma metodológico da Figura 4, por ‘Implementação do algoritmo da localização da falha no Pentágono de Duval’. Por último, os algoritmos elaborados passaram por ‘Testes e ajustes finais’, incluindo experimentos comparativos, que utilizaram Redes Neurais Artificiais.

**Figura 4 – Fluxograma geral da metodologia**

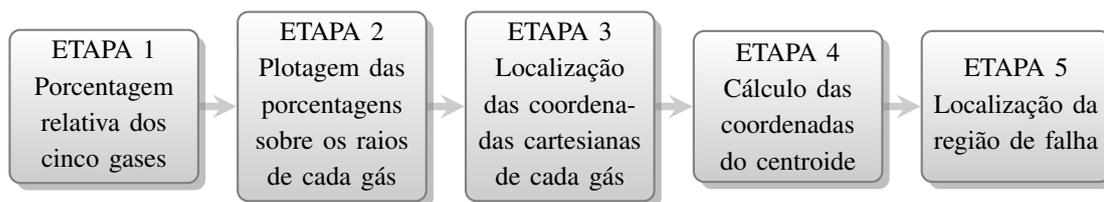


Fonte: Autores.

Conforme pesquisa bibliográfica e análise de artigos correlacionados ao tema, foi possível delimitar a estrutura, os parâmetros e as orientações quanto ao uso do método do Pentágono de Duval, fatores fundamentais à apropriação do tema e elaboração do *software*. A seguir, são apresentados, de forma esquemática, os pontos relevantes do Método do Pentágono de Duval, que constituíram a base para o desenvolvimento do código.

Conforme descrito por Cheim et al. (2020) e apresentado esquematicamente na Figura 5, para se chegar à leitura sobre o Pentágono de Duval, são necessários passos que foram estruturados como etapas numeradas que atuaram como fundamentos para a elaboração dos algoritmos resultantes do presente trabalho.

**Figura 5 – Fluxograma para execução do método do Pentágono de Duval**



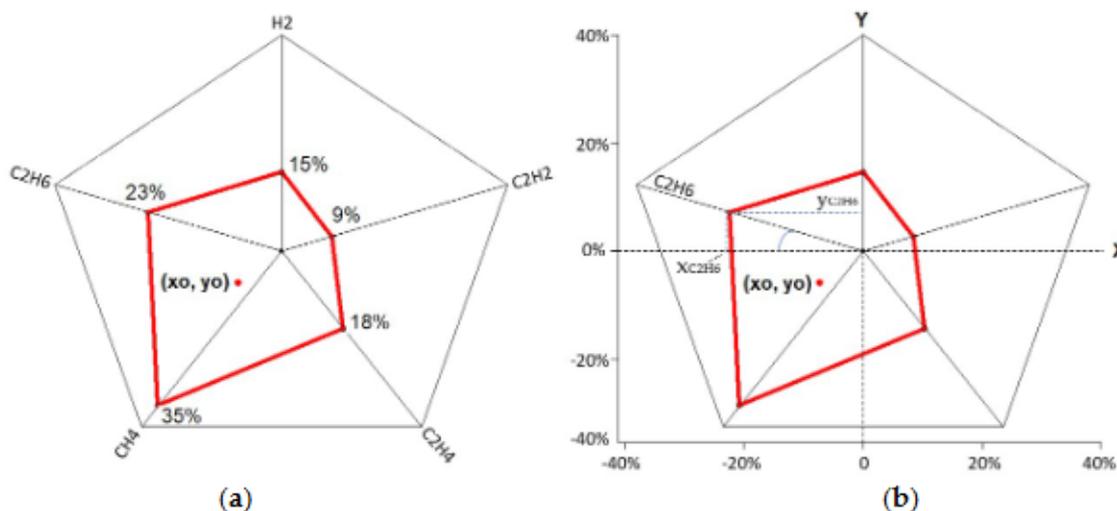
Fonte: Autores.

ETAPA 1 (Porcentagem relativa dos cinco gases) - Primeiramente, a porcentagem relativa de cada um dos cinco gases hidrocarbonetos (hidrogênio, acetileno, etileno, metano e etano), que estavam dissolvidos no óleo isolante e medidos em partes por milhão (ppm), foi calculada. A contribuição relativa de cada gás foi encontrada ao se dividir a quantidade deste gás, em ppm, pelo somatório dos cinco componentes, em ppm, e multiplicado por 100.

ETAPA 2 (Plotagem das porcentagens sobre o pentágono da Figura 6a) - O valor obtido para cada gás foi então plotado sobre o pentágono que apresenta cinco raios que partem do centro da figura geométrica. Cada raio tem a leitura partindo de 0% ao centro, até 100% no

vértice. Assim, cada raio representa um dos cinco gases, conforme a Figura 6a. A plotagem das cinco porcentagens relativas obtidas forma um polígono irregular interno ao pentágono, mostrado em vermelho nas Figuras 6a e 6b.

**Figura 6 – Plotagem da leitura da porcentagem dos gases sobre o pentágono**



Fonte: (CHEIM et al., 2020).

ETAPA 3 (Localização das coordenadas cartesianas de cada gás) - Como o centroide do polígono irregular corresponde à leitura do pentágono para a proporção dos gases em análise, se faz necessário encontrar matematicamente as coordenadas  $x$  e  $y$  de cada vértice do polígono irregular, para posterior cálculo do centroide. Uma linha horizontal (eixo  $x$ ) e outra vertical (eixo  $y$ ) foram então adicionadas ao centro do pentágono como mostra a Figura 6b. Assim, tem-se os ângulos a seguir para cada um dos raios que representam as porcentagens dos gases:

$$C_2H_2 = 18^\circ; H_2 = 90^\circ; C_2H_6 = 162^\circ; CH_4 = 234^\circ; C_2H_4 = 306^\circ$$

As coordenadas  $x$  e  $y$  relativas às porcentagens são, então, calculadas, para cada um dos gases, a partir das equações:

$$x \text{ do gás} = (\text{porcentagem relativa do gás}) * \cos(\text{ângulo do raio do gás})$$

$$y \text{ do gás} = (\text{porcentagem relativa do gás}) * \sin(\text{ângulo do raio do gás})$$

Considerando-se, como exemplo, o gás  $C_2H_6$ , as coordenadas do vértice associado a esse gás podem ser calculadas pelas fórmulas:

$$x \text{ do } C_2H_6 = 23 * \cos(162^\circ) = -21,88$$

$$y \text{ do } C_2H_6 = 23 * \sin(162^\circ) = 7,11$$

ETAPA 4 (Cálculo das coordenadas do centroide) - A partir das cinco coordenadas  $x$  e  $y$  de cada vértice do polígono irregular, as coordenadas do centroide ( $C_x$  e  $C_y$ ) são obtidas por meio das Equações 1, 2 e 3, onde  $A$  representa a área do polígono irregular.

$$C_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (1)$$

$$C_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (3)$$

ETAPA 5 (Localização da região do Pentágono de Duval correspondente às coordenadas do centroide) - Ao serem encontradas as coordenadas do centroide, torna-se possível localizar em qual das regiões de falha do Pentágono de Duval ele se encontra, passando a ser denominado assim ponto de localização.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção está subdividida em duas subseções. A Subseção 5.1 descreve a implementação do Método de Duval e a Subseção 5.2 relata os testes e experimentos comparativos de desempenho do algoritmo.

### 5.1 Implementação do Método de Duval

Após a análise dos parâmetros usados no método de Duval para a determinação de falhas no Pentágono, foi elaborado um primeiro código em Java capaz de realizar os cálculos necessários. Tal algoritmo fornece como saída as coordenadas  $C_x$  e  $C_y$  referentes ao centroide do polígono irregular, gerado pela porcentagem relativa de cada um dos cinco gases (Figuras 6a e 6b). As Etapas 1 a 4 descritas na Metodologia fundamentaram a elaboração desse algoritmo. Um segundo código foi elaborado para possibilitar que a leitura das coordenadas referentes ao centroide do polígono irregular, calculadas pelo primeiro código, fossem utilizadas como entrada e fornecesse como saída o tipo de falha. Para a elaboração de tal algoritmo, foi considerada a premissa de que cada região de falha do Pentágono de Duval possui coordenadas específicas que, ao serem interligadas com retas, formam as regiões PD, S, T1, T2, T3, D1 e D2, apresentadas na Figura 7. O código foi disponibilizado em um Drive<sup>6</sup>, onde são apresentados exemplos de resultados e instruções para execução.

Cada uma das retas que compõe as laterais de cada região possui um coeficiente de inclinação ( $m$ ) que pode ser calculado a partir das coordenadas indicadas na Figura 7. Com esse coeficiente de inclinação de cada reta fica possível determinar se as coordenadas do centroide (obtido com o primeiro código elaborado) se encontra abaixo, acima ou sobre essa reta.

Para a obtenção do coeficiente de inclinação ( $m$ ) de cada reta, foi utilizada a Equação 4,

---

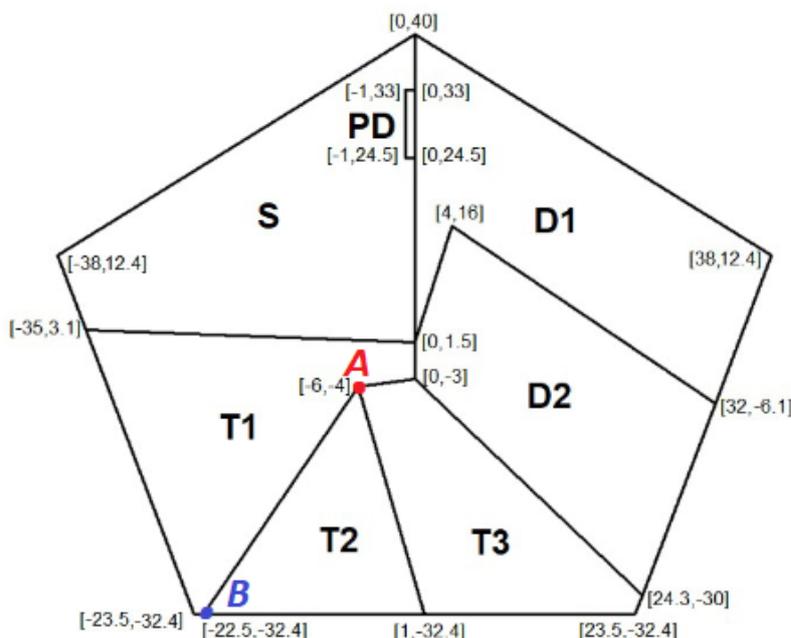
<sup>6</sup>[https://drive.google.com/drive/folders/15aH0Z7L\\_4e8XS1nDYUb5PtgvzZxPAvOL](https://drive.google.com/drive/folders/15aH0Z7L_4e8XS1nDYUb5PtgvzZxPAvOL)

chamada também de coeficiente angular de uma reta, a partir dos pontos  $A$  e  $B$  que delimitam tal reta:

$$m = (y_B - y_A)/(x_B - x_A) \quad (4)$$

onde  $(x_A, y_A)$  correspondem às coordenadas  $x$  e  $y$  de um ponto  $A$  e  $(x_B, y_B)$  às coordenadas  $x$  e  $y$  do ponto adjacente da mesma reta, que chamaremos de ponto  $B$ .

**Figura 7 – Coordenadas das sete regiões de falha do Pentágono de Duval**



Fonte: (CHEIM et al., 2020).

Após a obtenção dos coeficientes angulares de cada reta no Pentágono de Duval, foi calculado, dentro do código, por meio da Equação 5, o valor  $P$ , que indica o posicionamento do centroide com relação a cada reta, atuando como parâmetro para a localização do centroide. Quando a Equação 5 apresenta um valor igual a zero, indica que o centroide se encontra exatamente sobre essa reta e quando apresenta valores maiores ou menores que zero, indica se o centroide se encontra à sua direita ou à sua esquerda.

$$P = (m * (Cx - x_A)) - (Cy - y_A) \quad (5)$$

onde  $m$  é o coeficiente angular da reta,  $Cx$  a coordenada  $x$  do centroide,  $x_A$  a coordenada  $x$  do ponto  $A$ ,  $Cy$  a coordenada  $y$  do centroide e  $y_A$  a coordenada  $y$  do ponto  $A$ .

Para exemplificação e melhor entendimento, utiliza-se a reta de divisa entre as regiões T1 e T2. Essa reta, delimitada pelos pontos  $A(-6, -4)$  e  $B(-22.5, -32.4)$  conforme a Figura 7,

apresenta o seguinte coeficiente angular:

$$m = ((-32.4) - (-4.0)) / ((-22.5) - (-6.0)) = 1.7212$$

O seguinte parâmetro do centroide é calculado:

$$P = (1.7212 * (C_x - (-6.0)) - (C_y - (-4.0)))$$

Se esse parâmetro  $P$ , com a substituição das coordenadas do centroide da amostra ( $C_x$  e  $C_y$ ), for zero, significa que esse centroide se encontra exatamente sobre essa reta  $AB$ . Caso o  $P$  dê um resultado maior que zero, o centroide se localiza dentro da região T2 e caso seja menor que zero estará na região T1.

Desse modo, foi possível estipular os parâmetros de centroide para todas as retas do pentágono, conforme a Figura 8 (denominadas  $P1$  a  $P15$ ), que são usadas a cada rodada do código com a entrada dos valores de gases da amostra do óleo isolante. Estes parâmetros de centroide, referentes à amostra, então são utilizados em uma estrutura condicional *if/else*. Nesta estrutura, foram colocados, para cada região, as equações referentes aos lados desta região como parâmetros de inclusão ou exclusão da leitura em análise. Assim, cada região é delimitada por equações de coeficientes angulares próprios, que permitem a análise se o centroide se encontra dentro ou fora de cada uma, por meio da estrutura condicional do código, como pode ser visto no fragmento do código em "Algoritmo 1".

### Algoritmo 1 - Condicionais para delimitar a região de localização do centroide no Pentágono de Duval

---

#### Algoritmo 1: Condicionais das regiões do Pentágono de Duval

---

**Entrada:** Coordenadas do centroide ( $C_x, C_y$ )

**Saída:** Abreviatura da região do Pentágono de Duval onde o centroide se localiza

**if** ( $C_x \leq 0.0$  and  $C_x \geq -1.0$ ) and ( $C_y \leq 33.0$  and  $C_y \geq 24.5$ ) **then PD**

**else if** ( $C_x = 0.0$  and  $C_y = 1.5$ ) or ( $C_x = 0.0$  and  $C_y = -3.0$ ) **then D2**

**else if** ( $C_x < 0.0$  and  $C_y > 1.5$ ) and ( $P1 \geq 0.0$  and  $P2 \leq 0.0$  and  $P3 < 0.0$ ) **then S**

**else if** ( $C_x \leq 0.0$  and  $C_y \leq 3.1$ ) and ( $P3 \geq 0.0$  and  $P4 \leq 0.0$  and  $P5 \leq 0.0$  and  $P6 > 0.0$  and  $P7 < 0.0$ ) **then T1**

**else if** ( $C_x \leq 0.0$  and  $C_y \leq 3.1$ ) and ( $P3 \geq 0.0$  and  $P4 \leq 0.0$  and  $P5 \leq 0.0$  and  $P6 < 0.0$ ) **then T1**

**else if** ( $C_x < 1.0$ ) and ( $P5 \leq 0.0$  and  $P6 \geq 0.0$  and  $P8 > 0.0$ ) **then T2**

**else if** ( $C_x \geq -6.0$ ) and ( $P5 \leq 0.0$  and  $P7 \geq 0.0$  and  $P8 \leq 0.0$  and  $P9 \leq 0.0$  and  $P10 > 0.0$ ) **then T3**

**else if** ( $C_x > 0.0$ ) and ( $P10 \leq 0.0$  and  $P11 \leq 0.0$  and  $P12 \geq 0.0$  and  $P13 \geq 0.0$ ) **then D2**

**else if** ( $C_x \geq 0.0$ ) and ( $P12 < 0.0$  and  $P15 \geq 0.0$ ) **then D1**

**else if** ( $C_x > 0.0$ ) and ( $P12 \geq 0.0$  and  $P13 < 0.0$  and  $P14 \leq 0.0$  and  $P15 \geq 0.0$ ) **then D1**

**else then indeterminado**

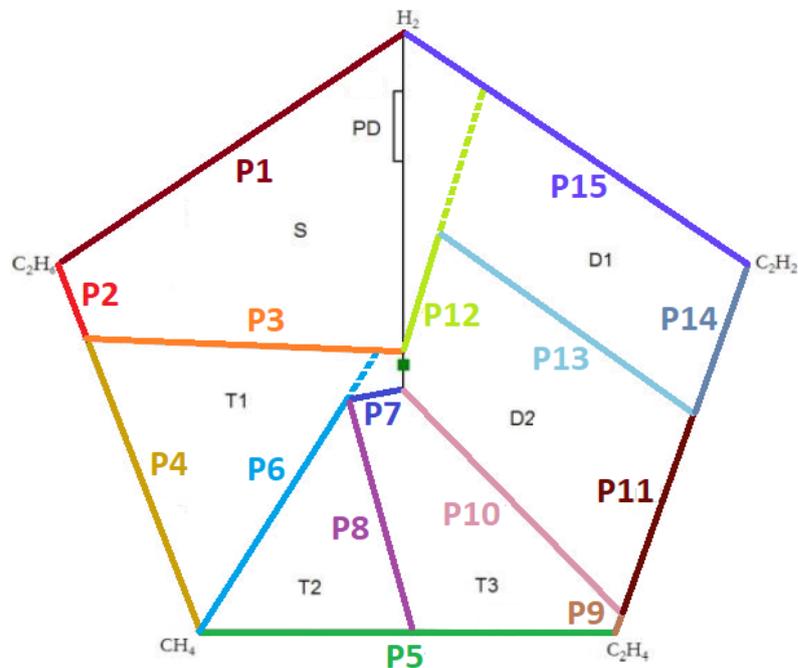
---

**Fonte:** Autores.

Assim, para cada parâmetro de centroide ( $P$ ), a partir das coordenadas do centroide em análise, a estrutura condicional elaborada possibilita a determinação da região correspondente.

Todo o processo de construção e reformulação dos códigos foi realizado por meio do

Figura 8 – Cada reta corresponde a um Parâmetro de Centroide (P)



Fonte: Autores.

trabalho de Duval e Lamarre (2014), onde há valores de entrada e resultados obtidos a cada etapa. O código proposto neste presente artigo apresentou os mesmos resultados obtidos pelos autores supracitados. O artigo de Duval e Lamarre (2014) apresentava somente o resultado para um centroide localizado na região T1. Além deste suporte com dados já testados, foi realizado, após elaboração dos códigos, a determinação de valores de coordenadas de centroides em pontos relevantes, conforme valores possíveis de entrada de concentração de gases, com o intuito de testar se o segundo código estava detectando precisamente os centroides dentro de cada região. A Figura 9 apresenta os valores de centroides sobre pontos críticos para teste, assim como leituras internas a cada região. Foram realizados ajustes no código, quando localizados pontos de leituras indeterminadas ou leituras errôneas.

A Tabela 2 apresenta as coordenadas utilizadas para a realização dos testes e as regiões do Pentágono de Duval a que pertencem. As coordenadas foram inseridas no código de modo a confirmar se, de fato o algoritmo estava sendo preciso na delimitação da falha correspondente. Essa inserção tornou possível a validação de pontos próximos às retas que limitavam as regiões de falhas.

## 5.2 Testes e Experimentos Comparativos

Dentre todos os valores de coordenadas testados, somente dois não apresentaram de imediato a leitura esperada, demandando ajustes no código. As leituras das coordenadas  $Cx = 0.0$ ,  $Cy = 1.5$  e  $Cx = 0.0$ ,  $Cy = 3.0$  apresentavam como saída do código que a região detectada era indeterminada, quando, na verdade, deveriam apresentar a leitura D2 para ambas as coordenadas. Após análise e *debug* do código, foi constatado que se tratavam de coordenadas que, por



se encontrarem na interseção de duas ou mais regiões e com possibilidades de interpretações conflitantes, o código levava tais leituras para a última opção da cadeia de condicionais. Assim, foi introduzida mais uma linha de código delimitando que, essas coordenadas, em específico, devem gerar, como saída, a leitura *D2*.

Um detalhe importante que demandou informações extras e ajustes no código foi quanto aos pontos de interseção de regiões. Como as leituras poderiam cair exatamente sobre as retas de interseção entre duas ou mais regiões, foi definido que a falha seria associada às leituras de maior relevância do ponto de vista de risco para o transformador.

Com o intuito de comparar o método proposto com uma técnica que utilize aprendizado de máquina, o algoritmo desenvolvido e uma Rede Neural Multilayer Perceptron (MLP) foram utilizados para classificar falhas, utilizando-se a base de dados *IEC TC 10 Database of Faulty Equipment Inspected in Service* (DUVAL; DEPABLA, 2001). Essa base contém o percentual das medições de sete gases nos equipamentos:  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_3$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $CO$  e  $CO_2$ . Nesse experimento comparativo, os percentuais relativos aos dois últimos gases são descartados e somente os cinco gases presentes na descrição do Pentágono de Duval são utilizados. Apenas cinco possíveis falhas são associadas ao experimento: *Partial Discharge* (PD), *Discharge of low energy* (D1), *Discharge of high energy* (D2), Falhas de temperatura abaixo de  $300^\circ C$  e entre  $300^\circ C$  e  $700^\circ C$  (T1 & T2) e Falhas de temperatura acima de  $700^\circ C$  (T3). A base de dados, originalmente, continha 116 registros. Porém, com a remoção de alguns dados ausentes nas medições dos cinco primeiros gases, foram utilizados apenas 99 registros.

A base de dados final foi utilizada como entrada para o algoritmo proposto e para a Rede Neural MLP. As informações de configuração da Rede Neural MLP estão descritas na Tabela 3.

**Tabela 3 – Configurações do modelo MLP**

Camada (tipo)	Formato da Saída	Qtd Parâmetros	Infos Adicionais
Dense	256	1280	Função de Ativação ReLU
Dropout	256	0	Taxa de Dropout 0.2
Dense	128	32896	Função de Ativação ReLU
Dropout	128	0	Taxa de Dropout 0.2
Dense	5	645	Função de Ativação SoftMax

Fonte: Autores.

A Rede Neural MLP foi treinada com 300 épocas, otimizador Adam e com a função de perda *Sparse Categorical Crossentropy*, considerando-se que as classes de erros foram representadas numericamente. O método de *resampling* validação cruzada (*cross-validation*) foi aplicado à base de dados com a escolha de 10 *folds*. As métricas de acurácia e *F1-score* do modelo foram obtidas a partir da agregação de todas as *folds* de teste. Para a implementação, a linguagem de programação Python com a biblioteca *keras*<sup>6</sup> foi utilizada.

<sup>6</sup><https://keras.io/>

**Tabela 4 – Métricas do MLP e Algoritmo**

	<b>Acurácia</b>	<b>F1-score</b>
MLP	0.68	0.64
Algoritmo	0.85	0.85

**Fonte: Autores.**

As métricas finais foram a média de cinco execuções do modelo, considerando-se a natureza não determinística de modelos de aprendizado de máquina, e estão presentes na Tabela 4.

Observa-se que os resultados obtidos pelo algoritmo são superiores aos da Rede Neural MLP. Os experimentos comparativos utilizaram uma base de dados com 99 registros. Para melhorar o desempenho da Rede Neural MLP, é necessário ampliar esta base de dados e realizar outros experimentos para ajustar os parâmetros da Rede Neural Artificial. Ao analisar as classes geradas incorretamente pelo algoritmo, percebe-se que os erros mais comuns estão relacionados à classificação errônea de falhas que apresentam algum grau de similaridade, como classificar D1 em D2, que são falhas relacionadas à baixa e alta energia ou T3 em T1 e T2, e vice-versa, que são falhas relacionadas à temperatura.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de Pentágono de Duval é um dos métodos que possibilita melhor detalhamento sobre o tipo de falha interna dos transformadores a partir da análise de cinco gases dissolvidos no óleo isolante desses transformadores. O presente trabalho apresenta a elaboração de algoritmos capazes de automatizar a etapa correspondente à análise desses gases, utilizando tal método.

Dois algoritmos foram implementados e testados, apresentando alta confiabilidade em sua execução. O primeiro algoritmo corresponde aos cálculos necessários para obtenção de um ponto de localização, dentro de um pentágono, que possua em cada um de seus cinco raios, as porcentagens relativas dos gases em análise. Tais cálculos, por serem implementados seguindo os parâmetros elaborados por Duval (CHEIM et al., 2020), não representaram grandes desafios para elaboração do código, além de cuidados normais com as entradas de valores e cálculos necessários. O segundo algoritmo foi implementado de forma a possibilitar a transformação do ponto de localização, obtido com o algoritmo anterior, em uma interpretação de qual região do Pentágono de Duval tal ponto pertence, possibilitando, assim, a identificação do tipo de falha correspondente. Esse segundo algoritmo demandou esforços para que fosse possível ser delimitada a região da falha com precisão. O uso de coeficientes angulares de cada reta, para posterior análise, confluindo várias retas, exigiu grande atenção a detalhes e reformulações até que fosse possível a efetiva implementação do código.

Para averiguar o desempenho do algoritmo, foi realizado um teste comparativo com um modelo de classificação de Redes Neurais MLP. Os resultados indicam uma acurácia de

85% proveniente da classificação de falhas com os algoritmos em comparação com 64% do modelo MLP. Nesse contexto e utilizando-se as métricas definidas, percebe-se que o algoritmo implementado tem resultados melhores que a Rede Neural MLP. A base de dados foi criada por especialistas que avaliaram as situações de falha relacionadas aos percentuais dos cinco gases. Porém, o número de registros, que ainda é pequeno, não favorece o treinamento da Rede Neural Artificial.

A implementação dos algoritmos foi realizada com base nos pontos de referência elaborados por Duval para o Pentágono 1 (CHEIM et al., 2020) e podem ser utilizados como base para a implementação futura de algoritmos também eficazes para o Pentágono 2, modificando-se pequenos pontos de divergência de leitura entre os dois pentágonos.

Uma possível continuidade do presente trabalho, além da implementação de algoritmo para o Pentágono 2, está relacionada à construção de uma interface para o usuário, onde pode ser visualizado, sobre o Pentágono de Duval, a localização do ponto da leitura da amostra. O primeiro algoritmo poderá ser incorporado a esta proposta de forma a ser possível a plotagem da leitura sobre uma imagem contendo as regiões delimitadas por Duval. Já o segundo algoritmo pode ser incorporado à interface do usuário para a liberação de uma descrição da região de falha e orientações pertinentes e específicas a tal falha.

## Referências

- ACIU, A.-M. et al. Complementary analysis for dga based on duval methods and furan compounds using artificial neural networks. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 14, n. 3, p. 588, 2021.
- BINDER, W. Trends in power transformer failure analysis. **Transformers Magazine**, Merit Media Int. doo, v. 1, n. 2, p. 20–24, 2014.
- BUSTAMANTE, S. et al. Dissolved gas analysis equipment for online monitoring of transformer oil: A review. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 19, p. 4057, 2019.
- CAMPOS FILHO, J.S. **Método do triângulo de Duval para análise dos óleos isolantes silicone e éster natural**. 2017. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba.
- CHEIM, L.; DUVAL, M.; HAIDER, S. Combined duval pentagons: A simplified approach. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 11, p. 2859, 2020.
- CHRISTINA, A. et al. Causes of transformer failures and diagnostic methods—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 82, p. 1442–1456, 2018.
- DENG, X. et al. Online dissolved gas analysis (dga) monitoring system. **arXiv preprint arXiv:1909.02451**, 2019.
- DUVAL, M. A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers. **IEEE electrical Insulation magazine**, IEEE, v. 18, n. 3, p. 8–17, 2002.
- DUVAL, M. Use of pentagons and triangles for the interpretation of dga in electrical equipment. In: **Proceedings of the TechCon North America 2017**. Houston, Texas, USA: Curran Associates, Inc., 2016.
- DUVAL, M.; BUCHACZ, J. Identification of arcing faults in paper and oil in transformers—part i: Using the duval pentagons. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 38, n. 1, p. 19–23, 2022.
- DUVAL, M.; DEPABLA, A. Interpretation of gas-in-oil analysis using new iec publication 60599 and iec tc 10 databases. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 17, n. 2, p. 31–41, 2001.
- DUVAL, M.; LAMARRE, L. The duval pentagon—a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, IEEE, v. 30, n. 6, p. 9–12, 2014.
- HOSSEINI, M. et al. Construction of a transformer dga health index based on dga screening processes. In: **Proceedings of the IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)**. Virtual Conference: IEEE, 2020. p. 391–394.
- HU, H. et al. Software implementation of automatic fault identification based on the duval pentagon. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2020. v. 1633, n. 1, p. 012135.

IRUNGU, G.K.; AKUMU, A.O. Quick fault severity determination using dissolved gas analysis with different gas ratio fault identification techniques. In: **Proceedings of the IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)**. Denver, CO, USA: Association for Computing Machinery, 2021. p. 76–79.

LATA, P.; VADHERA, S. Case study: Reliability enhancement of power transformer using dga. In: **Proceedings of the 2017 International Conference on Industrial Design Engineering**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2017. (ICIDE 2017), p. 6–10. ISBN 9781450348669.

ONS. Análise da perturbação do dia 03/11/2020 às 20h48min com início nos transformadores de 230/69/13,8 kv DA SE Macapá, com desligamento da UHE Coaracy Nunes e do sistema Amapá. In: ONS. **ONS DGL-REL-0016/2020**. [S.l.], 2020.

PAIXÃO, L.A. **Avaliação da qualidade do óleo isolante em transformadores com o emprego da função discriminante quadrática**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

RAFIQ, M. et al. Use of vegetable oils as transformer oils—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 52, p. 308–324, 2015.

RODIAH, Y.; HARYONO, T.; SUHARYANTO. Life expectancy of transformer insulation system by reconditioning. In: **Proceedings of the 4th International Conference on Science and Technology (ICST)**. Yogyakarta, Indonesia: IEEE, 2018. p. 1–4.

SANERGRID. **Oil immersed electrical power transformers**. 2022. [Urlhttps://www.sanergid.com/en/transformers-and-electric-apparatus/76-oil-immersed-electrical-power-transformers-etra.html](https://www.sanergid.com/en/transformers-and-electric-apparatus/76-oil-immersed-electrical-power-transformers-etra.html).

SAP-APPLICATION-HELP. **Application Help for SAP Predictive Maintenance and Service, add-on for utilities**. 2022. Acesso: 04 de set. de 2022. Disponível em: <[https://help.sap.com/docs/SAP\\_PDMS\\_ADDON\\_UTIL\\_OP/f5b113983bdc45e58cbaa08765152e33/c18eb09d4544449a990e90a04521e817.html](https://help.sap.com/docs/SAP_PDMS_ADDON_UTIL_OP/f5b113983bdc45e58cbaa08765152e33/c18eb09d4544449a990e90a04521e817.html)>.

SINGH, J.; SINGH, S.; SINGH, A. Distribution transformer failure modes, effects and criticality analysis (fmeca). **Engineering Failure Analysis**, Elsevier, v. 99, p. 180–191, 2019.

VARAN, M.; YURTSEVER, U. Multi-dgas: A pattern based educational framework design for power transformers faults interpretation and comparative performance analysis. **Computer Applications in Engineering Education**, Wiley Online Library, v. 26, n. 2, p. 215–227, 2018.

WONG, S.Y. et al. Computational intelligence for preventive maintenance of power transformers. **Applied Soft Computing**, Elsevier, v. 114, p. 108129, 2022.

YU, Wenmin; YU, Ren; TAO, Jun. An unsupervised mutual information feature selection method based on svm for main transformer condition diagnosis in nuclear power plants. **Sustainability**, MDPI, v. 14, n. 5, p. 2700, 2022.