

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
JULIO DE MESQUITA FILHO – ILHA SOLTEIRA**

Alex Zanoni Peixinho

**Análise dos Gases Dissolvidos em Óleo Isolante de Transformador Elevador de
Alta Potência: Estudo de Caso**

Ilha Solteira

2024

Alex Zanoni Peixinho

Análise dos Gases Dissolvidos em Óleo Isolante de Transformador Elevador de Alta Potência: Estudo de Caso

Trabalho de graduação apresentado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti

Ilha Solteira

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

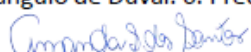
P379a Peixinho, Alex Zanoni.
Análise de gases dissolvidos em óleo isolante de transformador elevador de alta potência: estudo de caso / Alex Zanoni Peixinho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
49 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2025

Orientador: Ricardo Tokio Higuti

Inclui bibliografia

1. Transformadores. 2. Análise de Gases Dissolvidos (AGD). 3. Óleo isolante. 4. Confiabilidade. 5. Triângulo de Duval. 6. Predição de falhas.

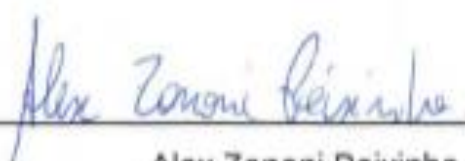

Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/5 9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos nove dias do mês de janeiro do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente **Alex Zanoni Peixinho**, matriculado sob o nº **161052002**, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti, o Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão e o Prof. Dr. Rodrigo Cardim, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Análise dos Gases Dissolvidos em Óleo Isolante de Transformador Elevador de Alta Potência: Estudo de Caso**", obtendo a nota 8,0 (oito) e conceito APROVADO.



Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti
- Orientador -



Alex Zanoni Peixinho
- Discente -



Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão
- Membro da Banca -



Prof. Dr. Rodrigo Cardim
- Membro da Banca -

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à minha família, que esteve ao meu lado durante toda a minha trajetória na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ao meu pai, José, à minha mãe, Anália, ao meu irmão, Alan, à minha cunhada, Carolina, e à minha namorada, Cibele, que sempre me ofereceram o apoio e o incentivo necessários enquanto eu estava longe de casa, buscando realizar o sonho de me tornar engenheiro eletricista.

Agradeço a Deus, pela inteligência e pelo dom da vida que me permitiram chegar até aqui, concluindo esta etapa tão significativa e desafiadora. Foram muitas as orações que fiz em momentos difíceis, e tenho certeza de que sem Sua presença eu não teria alcançado esta conquista.

Sou imensamente grato ao Professor Doutor Ricardo Tokio Higuti, por todo o suporte e orientação oferecidos ao longo da faculdade e, especialmente, durante o desenvolvimento deste trabalho de graduação. Estendo meus agradecimentos também aos colegas de turma, com destaque aos amigos com quem compartilhei moradia na república e que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio e companheirismo.

Gostaria também de agradecer ao Engenheiro Luiz Alberto Dimas Rezende, um grande profissional do setor de geração de energia, que me auxiliou com conhecimentos técnicos e apoio de campo na coleta de dados.

Por fim, deixo meu sincero agradecimento aos docentes e colaboradores da UNESP Ilha Solteira, que me receberam com tanto carinho e sempre estiveram dispostos a auxiliar durante toda a minha jornada acadêmica. A todos, meu muito obrigado!

Resumo

Este trabalho evidencia os resultados positivos obtidos com a aplicação da análise de gases dissolvidos (AGD) no óleo isolante como ferramenta de manutenção preditiva em transformadores de grande porte, essenciais para a transmissão e distribuição de energia elétrica. Utilizando a cromatografia gasosa, foi possível detectar falhas internas de um transformador, que causaram carbonização do papel isolante e desgaste de contatos internos. Estas falhas geraram descargas parciais no interior do equipamento, e a partir da identificação precoce dessas falhas foi possível executar uma manutenção corretiva precisa que, com um custo reduzido, graças a predição destas falhas, garantiu a restauração das condições operacionais e o aumento da vida útil do transformador. Utilizando o método de análise do Triângulo de Duval, a partir das concentrações dos gases Metano (CH_4), Etileno (C_2H_6) e Acetileno (C_2H_2), também foi possível comprovar a eficácia deste método de análise como ferramenta de apoio da manutenção. Os resultados obtidos demonstram ganhos expressivos em segurança, confiabilidade e economia, evidenciando a AGD como uma solução indispensável para a gestão estratégica de ativos elétricos. Com impacto direto na redução de custos corretivos e na longevidade dos equipamentos, a análise de gases dissolvidos no óleo isolante se consolida como uma prática fundamental para atender às demandas modernas do setor energético.

Palavras-chave: Transformadores, Análise de gases dissolvidos (AGD), óleo isolante, Confiabilidade, Triângulo de Duval, Predição de falhas.

Abstract

This work highlights the positive results achieved through the application of dissolved gas analysis (DGA) in insulating oil as a predictive maintenance tool for large power transformers, which are critical for energy transmission and distribution. Using gas chromatography, internal faults in a transformer were detected, including insulation paper carbonization and internal contact wear. These faults led to partial discharges inside the equipment. Early fault detection enabled precise corrective maintenance with reduced costs, ensuring operational restoration and extending the transformer's service life. By applying the Duval Triangle method to analyze the concentrations of Methane (CH_4), Ethylene (C_2H_6), and Acetylene (C_2H_2), the effectiveness of this analysis method as a maintenance support tool was confirmed. The results demonstrate significant improvements in safety, reliability, and cost-efficiency, underscoring DGA as an essential solution for strategic management of electrical assets. With a direct impact on reducing corrective maintenance costs and increasing equipment longevity, dissolved gas analysis in insulating oil proves to be a key practice for meeting modern energy sector demands.

Keywords: Transformers, Dissolved Gas Analysis (DGA), Insulating Oil, Reliability, Duval Triangle, Failure Prediction.

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de transformador ideal.	14
Figura 2 - Diagrama do Sistema Interligado Nacional (SIN).	14
Figura 3 - Retirada do tampão da válvula e limpeza do ponto de acesso.	20
Figura 4 - Conexão de mangueira para coleta.	20
Figura 5 – Coleta e Catalogação da amostra.	21
Figura 6 – Diagrama de bloco do cromatógrafo gasoso.	22
Figura 7 – Diagrama mostrando a separação de uma mistura dos componentes A e B por cromatografia.	23
Figura 8 - Coluna Capilar.	24
Figura 9 - Coluna Empacotada.	24
Figura 10 - Impacto da temperatura em cromatograma gasoso; (a) Coluna a 45°C; (b) Coluna a 145°C; (c) Coluna com temperatura variando de 30°C a 180°C.	25
Figura 11 - Exemplo de célula do detector de condutividade térmica.	27
Figura 12 - Exemplo de detector por Ionização de Chama.	28
Figura 13 – Triângulo de Duval.	29
Figura 14 - Exemplo de aplicação do triângulo de Duval	32
Figura 15 - Evolução da concentração de cada gás obtido via análise cromatográfica no período de julho de 2023 a maio de 2024	35
Figura 16 - Triângulo de Duval análise de gases dissolvidos de 06 de julho de 2023.	41
Figura 17 - Triângulo de Duval análise de gases dissolvidos de 18 de agosto de 2023.	42
Figura 18 - Triângulo de Duval análise de gases dissolvidos de 19 de dezembro de 2023.	43
Figura 19 – Triângulo de Duval análise de gases dissolvidos de 14 de maio de 2024.	44
Figura 20 - Desgastes do condutor que conecta o primário às bobinas do Transformador Elevador.	45
Figura 21 - Indícios de papel queimado no Transformador Elevador.	46
Figura 22 – Conexões do transformador restauradas após manutenção.	47
Figura 23 - Visão geral do transformador após manutenção.	47

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores medidos por tipo de detector cromatográfico.	26
Tabela 2 - Zonas de falha do triângulo Duval.	32
Tabela 3 - Valores da concentração nas análises de gases dissolvidos.	34
Tabela 4 - Valores da concentração nas análises de gases dissolvidos em ordem cronológica.	35

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

SIN	Sistema Interligado Nacional
DGA	<i>Dissolved Gas Analysis</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
TCD	<i>Thermal Conductivity Detector</i>
FID	<i>Flame Ionization Detector</i>
µL/L	Microlitro por Litro
PD	<i>Partial Discharges</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ – Resistividade elétrica do material

φ – Fluxo eletromagnético

SUMÁRIO

1. Introdução	13
1.1. Análise de gases dissolvidos - Agd	17
2. Metodologia	19
2.1. Coleta do óleo	19
2.2. Cromatografia Gasosa	21
2.3. Coluna cromatográfica	23
2.4. Detector de condutividade térmica	26
2.5. Detector por Ionização de Chama	28
2.6. Triângulo de Duval	29
3. Resultados	34
4. Conclusão	49
5. Referências	50

1. INTRODUÇÃO

Transformadores são dispositivos elétricos amplamente utilizados em instalações onde é necessário alterar o valor da tensão ou da corrente elétrica sem que haja perda significativa da potência no circuito. Isso facilita a medição da tensão e torna possível o uso de equipamentos que exigem uma tensão maior ou menor do que a fornecida pelo ponto de conexão.

Os transformadores são classificados como elevadores, quando aumentam a tensão, ou abaixadores, quando reduzem a tensão induzida em sua entrada, fornecendo uma tensão de menor magnitude na saída. Embora a quantidade total de potência permaneça constante, a tensão é ajustada para os níveis necessários conforme a aplicação desejada.

Um transformador é basicamente constituído por um núcleo feito de lâminas finas de ferro ou aço siliconado que ficam isoladas entre si para minimizar as perdas de potência por correntes parasitas provenientes da variação do seu próprio campo eletromagnético.

Na Figura 1 pode-se observar um exemplo de transformador ideal, em torno do núcleo são enroladas bobinas de fio de cobre ou alumínio que realizam a transformação de tensão elétrica ou da corrente elétrica, que utiliza o campo eletromagnético obtido a partir da circulação da corrente no enrolamento primário. Quando a corrente alternada é aplicada a bobina do primário, o campo eletromagnético gerado a partir da circulação de corrente se propaga pelo núcleo de ferro que induz uma corrente no enrolamento secundário. Esta corrente gerada no enrolamento secundário resulta em uma tensão que pode ser maior ou menor do que a tensão aplicada ao primário, a depender do tipo de transformador.

O cálculo da transformação de tensão em um transformador é baseado na relação entre o número de espiras nos enrolamentos primário e secundário. Essa relação determina o aumento ou a redução da tensão do transformador e a fórmula utilizada para calcular a transformação de tensão é a seguinte:

$$\frac{U1(V)}{U2(V)} = \frac{N1}{N2} \quad (1)$$

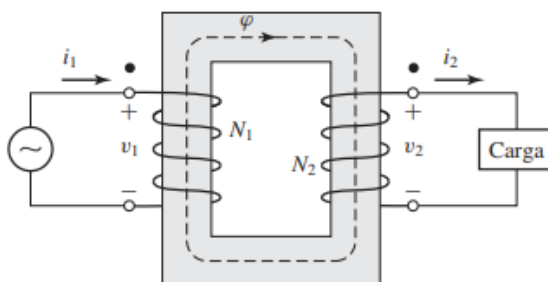
Em (1), N1 é o número de espiras do primário do transformador, N2 o número de espiras do secundário do transformador, U1 a tensão no primário do transformador e U2 a tensão de saída do secundário.

Conforme descrito por (UMANS, 2014), a corrente no enrolamento primário e secundário do transformador são inversamente proporcionais a tensão, dessa forma,

um transformador que eleva a tensão no secundário reduzirá a sua corrente do secundário, em relação ao primário. Esta demonstração é encontrada na equação (2):

$$\frac{i_1(A)}{i_2(A)} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2)$$

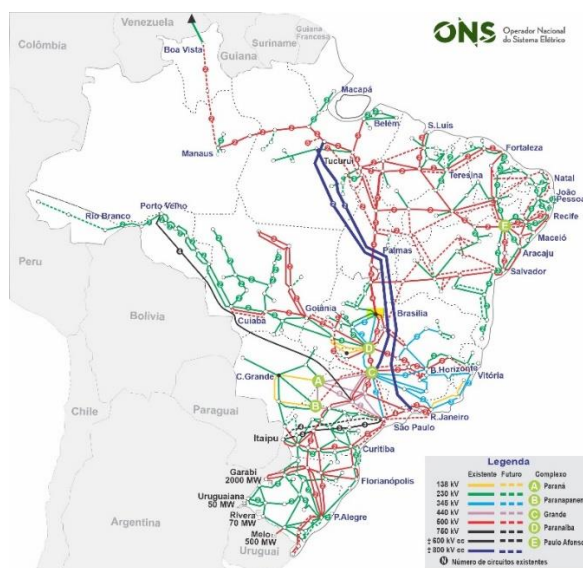
Figura 1 - Exemplo de transformador ideal.



Fonte: (UMANS, 2014)

Neste contexto, os transformadores elevadores desempenham um papel fundamental de elevar a tensão transmitida ao longo do sistema, mantendo a corrente significativamente mais baixa. Isso reduz casos de perdas de energia causadas por aquecimento dos cabos, e possibilita utilizar condutores com seção transversal menores, tornando a condução da corrente através dos condutores do Sistema Interligado Nacional (SIN) mais eficiente a custos menores.

Figura 2 - Diagrama do Sistema Interligado Nacional (SIN).



Fonte: INFOESCOLA. Componentes do Setor Elétrico. 2024

Dado que quanto maior a corrente elétrica que circula por um condutor, maior deve ser sua seção transversal, observam-se problemas desafiadores a transmissão de grandes quantidades de energia devido ao aquecimento de condutores, se mal dimensionados. Isto pode acarretar perdas substanciais de potência, o que compromete a eficiência do sistema e a estrutura do cabeamento. A potência elétrica pode ser calculada em (3).

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R \quad (3)$$

De acordo com a Lei de Ohm, a corrente elétrica (I) é inversamente proporcional à tensão (U) quando deseja-se manter a potência P constante. Um aumento na tensão resultará em uma diminuição da corrente, e o contrário também é verdadeiro.

Quando a corrente que passa pelo condutor é muito elevada, a agitação das moléculas do material promove a dissipação excessiva de energia térmica, comprometendo a energia útil do circuito. Em (3) pode-se calcular a potência dissipada nos condutores na situação descrita anteriormente (Corrente elétrica que circula por um condutor).

Agora, considere (4), que permite calcular a resistividade elétrica de um condutor transversal.

$$R(\Omega) = \rho \frac{L}{A} \quad (4)$$

Onde: ρ é a resistividade elétrica do material (em ohm-metros).

L é o comprimento do condutor (em Metros)

A é a área da seção transversal do condutor (em Metros quadrados)

A partir de (4) observa-se que a resistência do condutor é diretamente proporcional ao seu comprimento. De acordo com (3), quanto maior a resistência, maior será a potência dissipada no condutor.

Como o comprimento do condutor nesta situação é uma variável que não pode ser controlada, a alternativa viável é garantir que a corrente seja a menor possível. Assim, assegura-se que a potência dissipada no condutor também seja minimizada e a eficiência da transmissão de energia elétrica seja garantida.

Os transformadores elevadores são, portanto, essenciais para reduzir as perdas de energia na transmissão. Ao elevar a tensão, eles permitem que a corrente seja reduzida, o que diminui a potência dissipada nos condutores ao longo de grandes distâncias, além de tornar viável financeiramente um sistema com tamanha dimensão. Isso não apenas melhora a eficiência do sistema de transmissão, mas também contribui para a estabilidade e a confiabilidade do Sistema Interligado Nacional. Sem os transformadores elevadores, seria inviável transmitir energia elétrica de forma eficiente das usinas geradoras até os centros de consumo, destacando sua importância crucial no contexto da geração e transmissão de energia elétrica.

Com base nas considerações acima, conclui-se que os transformadores são essenciais para o fornecimento de energia elétrica, e, portanto, é fundamental assegurar que estejam sempre em pleno funcionamento, prevenindo falhas que possam comprometer seu desempenho, a fim de garantir a continuidade do fornecimento de energia sem interrupções.

A partir da equação (3) também pode-se adotar que a circulação de corrente pelos condutores das bobinas internas do transformador irá dissipar parte da potência na forma de calor. Em transformadores elevadores a corrente nos enrolamentos pode chegar a mais de 500 A e o aquecimento destes condutores pode causar danos ao isolamento dos condutores internos.

O isolamento dos condutores das bobinas de primário e secundário garantem que a corrente circule por toda a extensão da bobina, mantendo os condutores muito próximos um ao outro, e gerando assim o campo magnético, responsável por converter a tensão aplicada no primário a partir da corrente que o campo magnético gera no secundário, e o número de espiras presentes nele.

Por esse motivo, e para garantir o isolamento do núcleo do equipamento, os transformadores utilizam um óleo isolante em seu interior, este óleo possui alta resistência dielétrica capaz de impedir a passagem de corrente elétrica entre partes condutoras, e, também auxiliar na transferência do calor gerado pelas partes internas do transformador. Neste contexto, existem radiadores por onde o óleo é transportado, e que permitem a troca de calor, garantindo uma temperatura de trabalho adequada para o equipamento. O óleo isolante impede o contato do núcleo do transformador com o ambiente externo, protegendo-o de desgastes causados pela sua exposição ao ar, como a oxidação.

O óleo isolante é, portanto, um componente crucial em transformadores, pois desempenha múltiplas funções. Além de ajudar na dissipação de calor gerado pelas perdas internas e proporcionar isolamento elétrico, o óleo também atua como um meio de diagnóstico da condição interna do transformador por meio da análise de gases dissolvidos.

1.1. ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS - AGD

A AGD (Análise de Gases Dissolvidos) é uma técnica de monitoramento que consiste na análise dos gases dissolvidos no óleo isolante. Esse procedimento é fundamental para a manutenção preventiva e para a detecção precoce de falhas no transformador, como descargas parciais, queima do papel isolante nos condutores do núcleo, falhas entre fase e terra, entre outras.

O óleo isolante é composto principalmente de hidrocarbonetos, que começam a se decompor quando expostos ao calor intenso. A decomposição térmica dessas moléculas quebra as ligações químicas entre os átomos de carbono e hidrogênio, resultando na formação de gases como etileno, etano, hidrogênio, metano, monóxido e dióxido de Carbono.

Cada gás liberado pode apresentar um diagnóstico possível para o transformador, segundo (IEEE C57. 104, 2019) os seguintes diagnósticos podem ser obtidos:

- Hidrogênio (H): a presença de hidrogênio mesmo em pequenas quantidades, pode indicar a ocorrência de descargas parciais, entre os condutores internos do transformador. Quando ocorrem deficiências na isolação, presença de bolhas de ar no óleo ou até mesmo impurezas dentro deste óleo devido descargas que ocorrem entre os condutores, a partir desta baixa isolação, elas fazem com que o óleo libere hidrogênio a partir desta reação, sendo possível assim detectar a presença deste elemento já nas primeiras análises, possibilitando sanar o problema antes de se tornar grave.
- Metano (CH₄): A presença de Metano nas análises pode ser indicativa de que altas temperaturas estejam presentes no interior do equipamento, estas altas temperaturas não são excessivas, variando entre 150°C e 300°C, e são indicativos de um aquecimento por mal contato em um ponto específico ou até mesmo uma falha no sistema de resfriamento do transformador.
- Etileno (C₂H₄) e Etano (C₂H₆): A presença de Etileno e Etano nas análises também pode ser indicativo de que altas temperaturas estejam presentes no interior do equipamento, porém, estas temperaturas são maiores que as verificadas para o Metano. Variando entre 300°C e 500°C, encontra-se o Etano que também é indicativo de um aquecimento por mal contato ou uma falha no sistema de resfriamento do transformador, porém com temperaturas maiores que o Metano, podendo indicar falhas mais graves. Já o Etileno é formado com temperaturas superiores a 500°C, que são consideradas críticas para o ativo, e podem indicar falhas de isolamento, ou até mesmo curtos-circuitos internos.

- Acetileno (C_2H_2): A presença de acetileno no óleo isolante de um transformador indica falhas elétricas de alta energia, como arcos elétricos. O acetileno é formado sob condições extremas de temperatura e energia, típicas de arcos e curtos-circuitos graves, e é um indicador de que o transformador sofreu danos significativos que exigem atenção imediata.
- Monóxido de Carbono (CO) e Dióxido de Carbono (CO_2): A presença destes elementos na análise indicam em sua grande maioria uma degradação térmica do material isolante, normalmente composto por papel de celulose. Quando este material começa a se decompor, estes gases são encontrados nas análises indicando uma possível degradação natural do material, que ocorre com o envelhecimento do ativo, ou até mesmo a prolongada operação que podem causar altas temperaturas, e que também afetam o papel isolante.

A análise de gases dissolvidos aplicada na manutenção de transformadores contribui para prolongar a vida útil desses ativos, assegurando maior confiabilidade tanto no transformador quanto no SIN. Como mencionado anteriormente, o bom funcionamento dos transformadores é essencial para a transmissão ininterrupta de energia elétrica, garantindo a estabilidade e a eficiência do sistema.

Neste estudo, será avaliado o histórico de análises realizadas em um transformador elevador instalado em um complexo solar. Para preservar a confidencialidade da empresa responsável pela gestão do complexo, a localização não será divulgada. O transformador foi submetido a diversas análises ao longo dos anos, o que é comum, pois o monitoramento contínuo e a evolução dos gases no interior do equipamento permitem uma avaliação mais precisa e confiável das possíveis falhas que possam ocorrer.

2. METODOLOGIA

A análise de gases dissolvidos é um processo minucioso que deve ser realizado com extrema cautela, seguindo procedimentos rigorosos para a coleta e o envase da amostra. Caso a amostra seja contaminada por gases do ambiente externo, o resultado pode ser comprometido, levando a uma intervenção indevida em um equipamento que está em bom estado.

A metodologia para realizar a análise de gases dissolvidos de forma correta, envolve desde as equipes de campo que irão realizar a retirada da amostra, do transformador a ser analisado, até o laboratório responsável por analisar a amostra.

2.1. COLETA DO ÓLEO

Nos transformadores convencionais, a retirada da amostra é facilitada por uma válvula específica, que permite a coleta sem que o óleo do interior do equipamento entre em contato com o meio externo de forma rápida e segura para quem executa a atividade. Para retirada da amostra é necessário uso de Luva Nitrílica, balde para contenção do óleo, mangueira e uma seringa que será utilizada para coleta e envio da amostra.

Como procedimento operacional, as coletas são realizadas semestralmente em equipamentos que apresentem concentração de gases dentro da faixa de normalidade para o funcionamento correto do transformador. No entanto, nos casos em que as concentrações de gases, prejudiciais para o transformador, estejam acima da normalidade esperada para o equipamento, as coletas podem ser realizadas com maior frequência.

Na primeira etapa do processo (Figura 3) é necessário garantir um ponto de acesso limpo e seguro que possibilite a coleta do óleo do transformador, sem que este seja contaminado por impurezas externas ao equipamento. Para a coleta do óleo é necessário conectar uma mangueira (Figura 4) de forma a garantir que a coleta não entre em contato com o meio externo.

Figura 3 - Retirada do tampão da válvula e limpeza do ponto de acesso.



Fonte: Próprio autor

Figura 4 - Conexão de mangueira para coleta.



Fonte: Próprio autor

Utilizando a mangueira conectada, deve ser realizada a abertura da válvula até que toda a mangueira esteja preenchida com o óleo isolante do interior do equipamento, e em seguida realizar a coleta da amostra, retirando toda e qualquer bolha de ar da mangueira e da seringa.

Em seguida a coleta do óleo presente no interior do equipamento é feita, conforme Figura 5, e catalogada com os dados do ativo e data de coleta.

Figura 5 – Coleta e Catalogação da amostra.



Fonte: Próprio autor

Todo esse processo deve ser conduzido de forma a garantir que a amostra coletada não seja contaminada por gases externos, visto que isso pode comprometer o resultado, levando a uma avaliação incorreta do estado do equipamento e, consequentemente, invalidando o objetivo do experimento.

Ao final desta etapa, a amostra é enviada ao laboratório, onde é realizada a cromatografia gasosa. Nesse procedimento, o óleo passa por uma separação molecular, o que permite determinar a concentração de cada gás presente no interior do equipamento, os quais entraram em contato com o óleo isolante analisado.

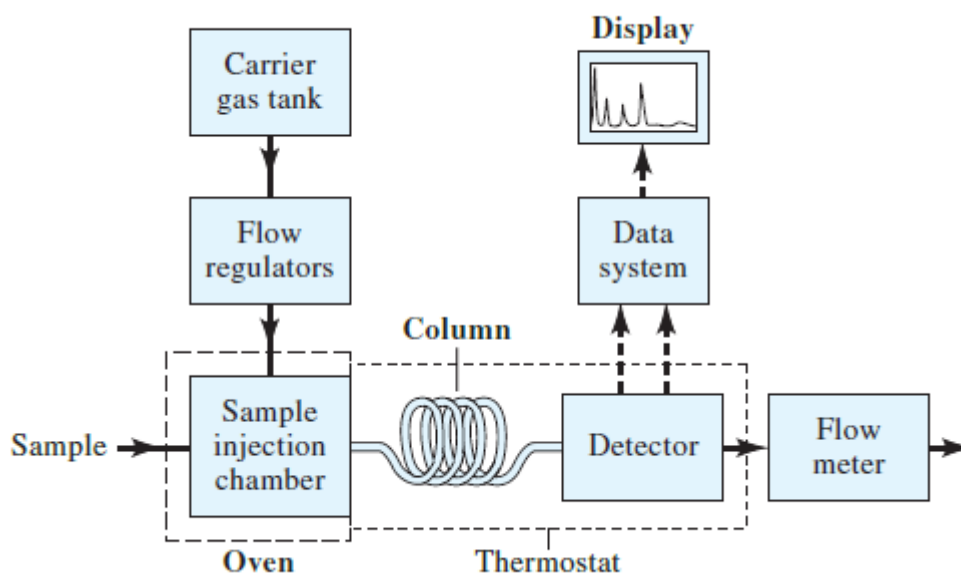
2.2. CROMATOGRAFIA GASOSA

O processo de cromatografia gasosa, é um processo comumente utilizado no diagnóstico de exames de sangue, e por este motivo a análise de óleo é também conhecida como o “Exame de sangue de transformadores”, pois a partir dela pode-se

diagnosticar muitas falhas, tal qual um exame de sangue possibilita o diagnóstico de doenças antes do surgimento de danos graves.

O cromatógrafo (Figura 6), equipamento utilizado para realização da cromatografia, consiste em uma técnica de separação de gases, portanto, só pode ser utilizada para líquidos voláteis, pois é necessário vaporizar o líquido, de forma que este gás passe por um tubo onde é feita a separação e análise da concentração dos gases. (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2018)

Figura 6 – Diagrama de bloco do cromatógrafo gasoso.

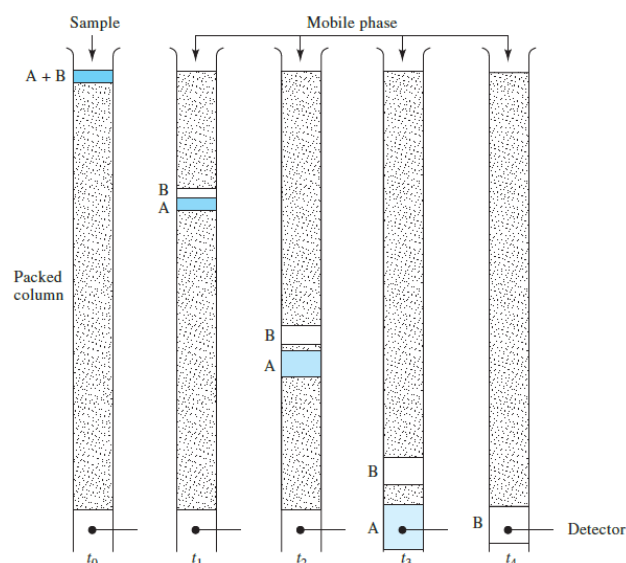


Fonte: (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2018)

O funcionamento do cromatógrafo baseia-se em duas fases fundamentais: a fase estacionária e a fase móvel.

A fase estacionária é composta por um material sólido localizado no interior da coluna cromatográfica, que atua como um retardador para as moléculas da amostra. Os gases injetados na coluna por meio de um gás de arraste, chamada de fase móvel, interagem com a fase estacionária enquanto atravessam a coluna. Durante esse percurso, as moléculas da amostra se separam de acordo com o tempo que levam para atravessar toda a extensão da coluna, permitindo a análise individualizada. Já a fase móvel, representada por um gás inorgânico, também denominado gás de arraste, tem a função de pressurizar o sistema e transportar a amostra através da coluna cromatográfica. A escolha de um gás inorgânico evita contaminações e garante que a análise seja realizada sem interferências (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2018). A Figura 7 ilustra o processo de separação das moléculas.

Figura 7 – Diagrama mostrando a separação de uma mistura dos componentes A e B por cromatografia.



Fonte: (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2018)

A Figura 7 apresenta um exemplo diagramado de uma coluna cromatográfica, ilustrando o processo de separação molecular. Conforme as moléculas atravessam a coluna, o meio estacionário presente em seu interior interage de maneira diferenciada com cada tipo de molécula, fazendo com que algumas percorram a coluna mais rapidamente que outras. Esse mecanismo permite a separação e a identificação individual das moléculas ao final da coluna.

2.3. COLUNA CROMATOGRÁFICA

A coluna cromatográfica é onde ocorre a separação dos gases a serem analisados. Segundo (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2018), ela pode ser de dois tipos: empacotada ou capilar.

A coluna capilar possui as paredes revestidas com o material que compõe a fase estacionária, tendo um diâmetro entre 0,1 e 0,5 mm e um comprimento que varia de 5 a 100 metros como é possível verificar na Figura 8.

Figura 8 - Coluna Capilar.



Fonte: (CHEMISTRY NET, 2013)

A coluna empacotada é preenchida completamente com o material estacionário, possui diâmetro maior (geralmente entre 3 e 6 mm) e comprimento mais curto, variando de 0,5 a 5 metros, como pode-se ver na Figura 9.

Figura 9 - Coluna Empacotada.



Fonte: (CHEMISTRY NET, 2013)

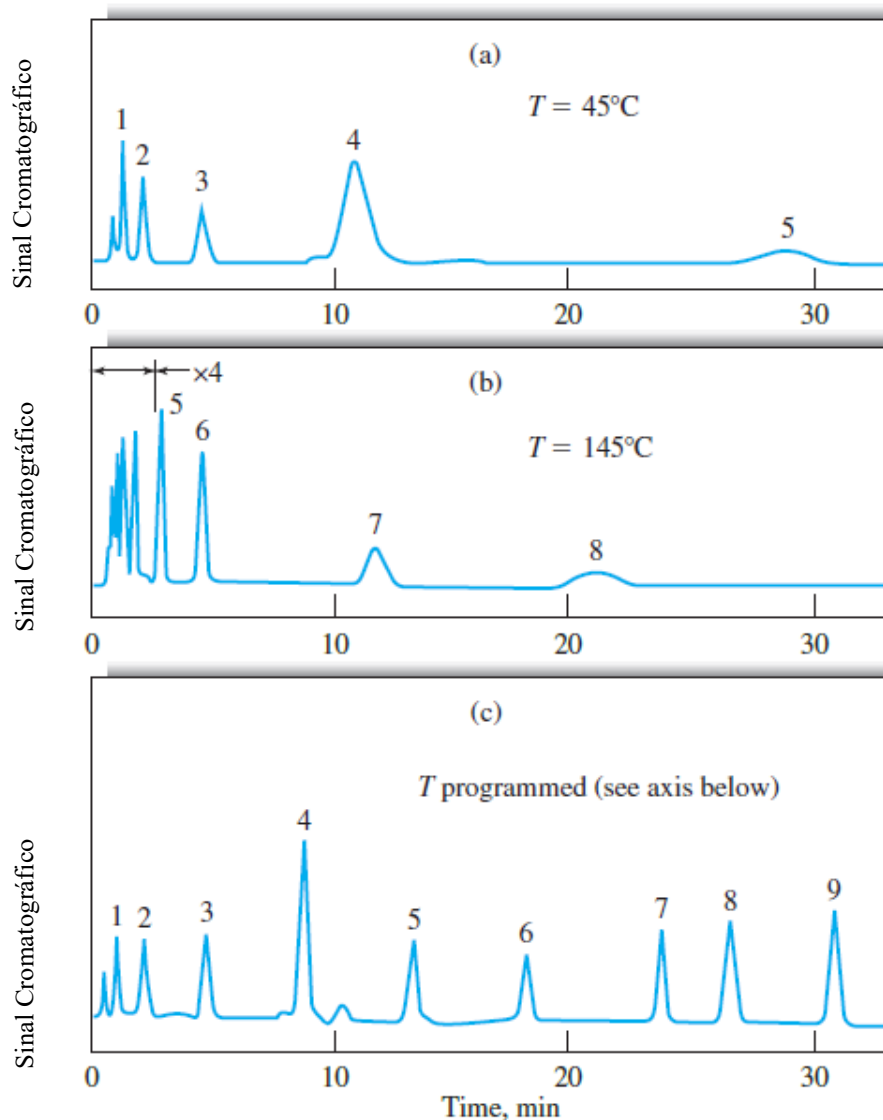
Neste experimento, foi utilizada a coluna capilar, pois o método de análise utilizado (ASTM INTERNATIONAL, 2017), especificamente desenvolvido para a análise de gases dissolvidos em óleo isolante, emprega esse tipo de coluna cromatográfica.

Para percorrer toda a extensão da coluna cromatográfica, o óleo é inserido na entrada do sistema, e um gás de arraste, que deve ser um gás inerte, como o Hélio (He) para que não ocorra alteração da amostra, é utilizado para fazer com que este óleo seja transportado por toda a extensão da coluna. Esse gás percorre toda a coluna cromatográfica, fazendo com que as moléculas maiores, como o Etano (C_2H_6), que é composto por 2 átomos de carbono e 6 átomos de hidrogênio, demorem mais tempo para atravessar a coluna devido ao maior tamanho e interações com a fase

estacionária. Em contraste, o Hidrogênio (H_2), composto por apenas 2 átomos de hidrogênio, atravessa a coluna mais rapidamente. Dessa forma, os diferentes gases se separam ao longo da coluna, com os componentes mais leves migrando mais rápido, enquanto os mais pesados demoram mais, facilitando a separação e a análise dos gases.

Ao passar pela coluna os gases necessitam ser detectados para que seja possível realizar a análise de concentração de cada gás. E nesta etapa existe mais uma dificuldade, que é a temperatura na qual o gás percorre a coluna, pois isto também influencia no tempo de passagem. Na Figura 10 abaixo pode-se analisar melhor este processo:

Figura 10 - Impacto da temperatura em cromatograma gasoso; (a) Coluna a 45°C; (b) Coluna a 145°C; (c) Coluna com temperatura variando de 30°C a 180°C.



Fonte: Adaptada de (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2018)

Como pode-se analisar na Figura 10, o eixo x apresenta o tempo necessário para o deslocamento das moléculas por toda a extensão da coluna cromatográfica, e o eixo y apresenta a concentração em picogramas dos gases analisados por cada detector. Como demonstra na Tabela 1, abaixo, cada detector utiliza uma medida que melhor atende o gás que este analisa:

Tabela 1 - Valores medidos por tipo de detector cromatográfico.

Type	Applicable Samples	Typical Detection Limit
Flame ionization	Hydrocarbons	1 pg/s
Thermal conductivity	Universal detector	500 pg/mL

Fonte: (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2018)

A uma temperatura de 45°C, os gases 6, 7, 8 e 9 não são adequadamente analisados, pois o tempo necessário para que esses gases percorram toda a extensão da coluna cromatográfica é insuficiente. No segundo teste, com a coluna a 145°C, todos os gases foram detectados no gráfico, mas os gases 1 a 4 passaram pela coluna muito rapidamente, dificultando a análise precisa da concentração destes componentes.

Por esse motivo, para uma análise mais precisa, a coluna cromatográfica deve ser colocada em um forno durante o processo. A variação da temperatura da coluna dentro do forno permite otimizar a separação dos gases, garantindo uma avaliação mais detalhada. O terceiro gráfico, obtido após essa modificação, apresenta as concentrações de cada amostra (eixo y) de forma mais clara, possibilitando a verificação exata da concentração de cada gás presente na amostra.

Para análise de óleo isolante, devido a grande quantidade de gases que necessitam ser detectados, é necessário que a amostra passe por dois detectores, após a passagem pela coluna cromatográfica, e são eles o TCD (*Thermal Conductivity Detector* - Detector de Condutividade Térmica) e o FID (*Flame Ionization Detector* - Detector por Ionização de Chama). (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2018)

2.4. DETECTOR DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

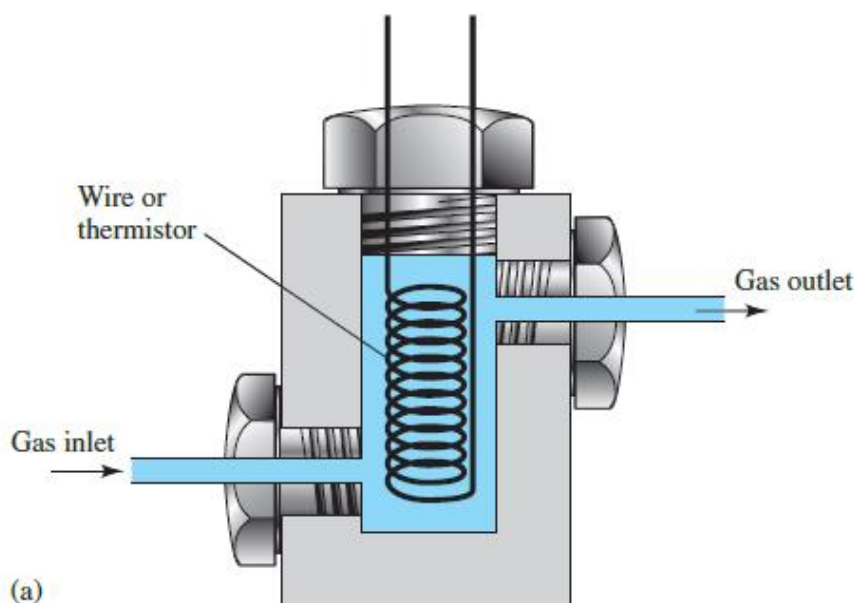
O detector de condutividade térmica (TCD, do inglês Thermal Conductivity Detector - Figura 11) funciona com base na medição da variação na condutividade térmica de um gás. O sistema consiste em um filamento aquecido por corrente elétrica, e quando a amostra passa pelo detector, o gás de arraste entra em contato com o filamento. A resistência do filamento é afetada pela composição do gás que o circunda, causando uma mudança na corrente elétrica necessária para manter a temperatura do filamento constante.

Durante o processo, o gás de arraste flui em paralelo com o gás de referência, o que permite que a amostra seja analisada em comparação com o gás de referência, garantindo uma medição precisa. Quando os gases presentes na amostra, que não são inertes, passam pelo filamento aquecido, a condutividade térmica desses gases altera a quantidade de calor absorvida pelo filamento. Isso causa uma modificação na corrente elétrica necessária para manter o filamento a uma temperatura constante.

Gases como o hidrogênio (H_2) e o dióxido de carbono (CO_2), que possuem uma condutividade térmica diferente dos gases inertes, alteram a resistência do filamento, gerando um sinal proporcional à concentração desses gases na amostra. Esse comportamento é o princípio básico de operação do TCD, permitindo a detecção e quantificação de gases inorgânicos, como hidrogênio e dióxido de carbono, presentes em uma amostra, como o óleo isolante de um transformador. O TCD é amplamente utilizado pela sua alta sensibilidade e capacidade de detectar uma variedade de gases com características térmicas distintas.

Um ponto interessante do detector de condutividade térmica é que ele é um analisador não destrutivo. Isso significa que, após a passagem da amostra por este estágio, o gás resultante pode ser reutilizado em outras análises. No caso deste experimento, por exemplo, a amostra analisada pelo TCD é posteriormente encaminhada a um detector por ionização de chama (FID - Flame Ionization Detector). Essa característica de não destrutividade do TCD torna o processo mais eficiente, permitindo múltiplas análises sem a necessidade de novas amostras. (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2018)

Figura 11 - Exemplo de célula do detector de condutividade térmica.



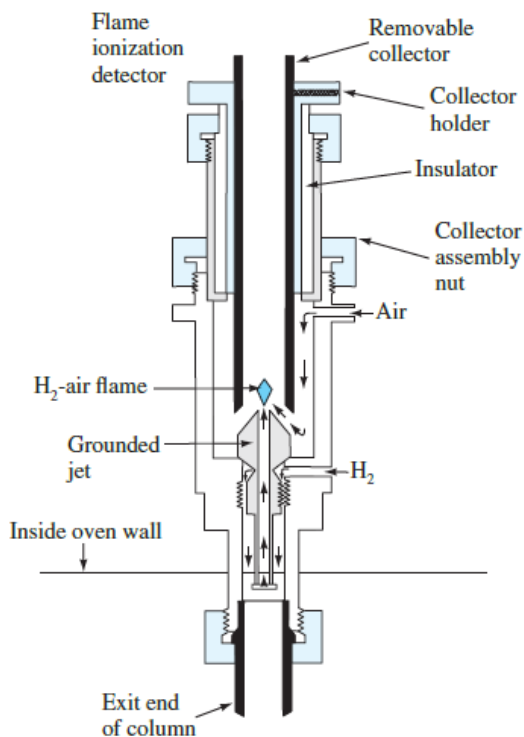
Fonte: (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2018)

2.5. DETECTOR POR IONIZAÇÃO DE CHAMA

O FID (Detector por Ionização de Chama - Flame Ionization Detector - Figura 12) funciona com base na ionização de compostos orgânicos por meio de uma chama gerada, normalmente, pela queima de hidrogênio (H_2), que é capaz de atingir altas temperaturas. Quando a amostra é introduzida na chama, ela sofre combustão, e as moléculas orgânicas presentes, que contêm ligações C-H e C-C, são pirolisadas. Durante esse processo, as ligações moleculares, que são mais fracas em compostos orgânicos, se rompem, liberando íons e elétrons.

Após a combustão, é aplicada uma diferença de potencial entre o bico que gera a chama e uma placa coletora posicionada sobre ela. A ionização do carbono presente nas moléculas gera uma corrente elétrica na faixa de picoamperes ($1 \times 10^{-12} A$), que é detectada pelo coletor. Esta corrente permite a quantificação da concentração dos gases presentes na amostra, visto que o gás de arraste não gera elétrons em sua combustão, permitindo assim expressar em partes por milhão ($\mu L/L$) a concentração do gás analisado. (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2018)

Figura 12 - Exemplo de detector por Ionização de Chama.



Fonte: (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2018)

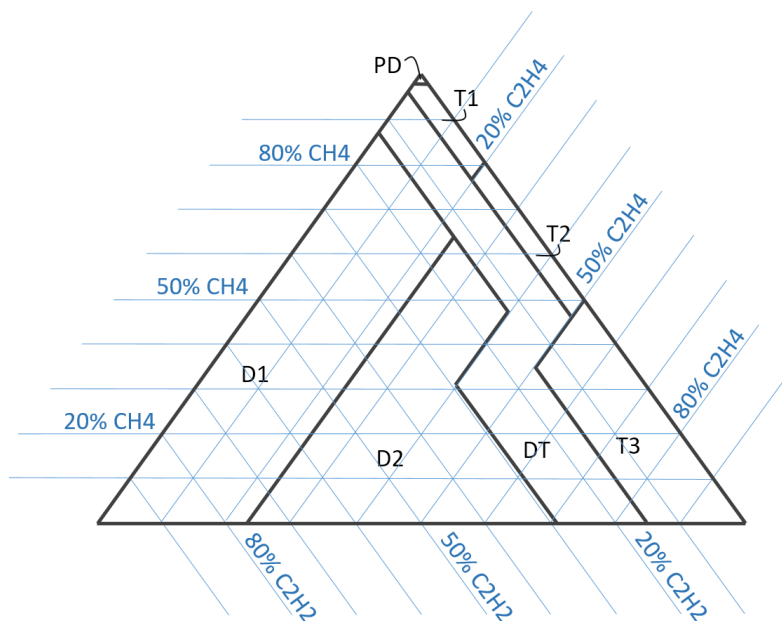
O resultado deste processo é um cromatograma, que é o gráfico de tempo x intensidade do sinal, este sinal é então convertido em microlitro por Litro ($\mu\text{L/L}$) e a partir de análises do tempo levado por cada amostra para atravessar a coluna cromatográfica é possível identificarmos os gases que geram cada pico do cromatograma da amostra e consequentemente a sua concentração.

2.6. TRIÂNGULO DE DUVAL

O triângulo Duval é uma ferramenta gráfica criada por Michel Duval (DUVAL, 1989). Utilizado para o diagnóstico de falhas em transformadores a partir dos resultados do DGA, o método do triângulo Duval se baseia nas diferentes falhas que cada concentração de gás presente no interior do transformador pode gerar, baseado nas falhas identificadas durante os anos.

O triângulo Duval (Figura 13) é um método analítico que utiliza em suas arestas os gases Metano (CH_4), Etileno(C_2H_4) e Acetileno(C_2H_2) variando de 0 a 100% de concentração, onde são comparadas as concentrações dos gases entre si e indicam uma possível falha do transformador analisado.

Figura 13 – Triângulo de Duval.



Fonte: (DR. ALEXANDER ALBER, [s.d.]

A análise é realizada comparando a concentração dos gases entre si, de forma que a soma da concentração de cada um dos gases gera uma concentração relativa, onde a presença em excesso de cada um destes gases resulta em uma falha potencial do ativo. Em cada aresta, são representadas as concentrações possíveis de cada gás, variando de 0% a 100%(DUVAL, 1989).

A partir de análises feitas, foi possível catalogar 6 falhas normalmente associadas a presença destes gases, e são elas:

- Descargas parciais (PD) também conhecidas como corona, são descargas que ocorrem, normalmente com baixa energia, e geralmente ocorrem dentro das bolhas de gás ou impurezas presentes no óleo ou no papel isolante.
- Descargas de baixa energia (D1), em óleo mineral e/ou papel, são descargas com mais energia, e estão normalmente associadas a perfurações no papel (furos), carbonização da superfície do papel (trilhas) ou partículas de carbono no óleo mineral (como na operação de comutadores de derivação).
- Descargas de alta energia (D2), quando ocorrem em óleo mineral e/ou papel, com surgimento de corrente elétrica, podem causar a destruição e carbonização extensiva do papel, fusão de metal nas extremidades da descarga, carbonização extensa no óleo mineral e, em alguns casos, desligamento do equipamento, devido a descarga de corrente elevada.

O aquecimento no óleo mineral e/ou papel, abaixo de 300 °C e que não causem a carbonização do papel, o deixando apenas marrom, são categorizadas como T1, já falhas térmicas acima de 300 °C que tenham carbonizado o papel são categorizadas como T2.

Falhas térmicas a temperaturas acima de 700 °C são categorizadas como T3, e indicam fortes evidências de carbonização do óleo mineral, descoloração do metal (800 °C) ou até mesmo a fusão do metal (>1000 °C).

Em (5) é possível calcular a concentração relativa (CR_i) de cada gás a ser analisado no triângulo de Duval, a partir da concentração absoluta do gás (CA_i) em $\mu\text{L/L}$ advindo do cromatograma, em relação a todos os gases presentes no triângulo Duval (CA_j).

Assim a equação (5) é descrita por:

$$CR_i (\%) = \frac{CA_i}{\sum_j CA_j} \cdot 100 \quad (5)$$

Considere um cromatograma que apresentou as seguintes concentrações de Metano (CH_4), Etileno(C_2H_4) e Acetileno(C_2H_2):

Metano (CH_4): 20 $\mu\text{L/L}$

Etileno(C_2H_4): 10 $\mu\text{L/L}$

Acetileno(C_2H_2): 10 $\mu\text{L/L}$

Com estes valores e fazendo uso da equação (5) é possível calcular as seguintes concentrações de gases:

$$\text{Metano (CH}_4\text{)}(\%) = \frac{\mu\text{L/L Metano}}{\mu\text{L/L Metano} + \mu\text{L/L Acetileno} + \mu\text{L/L Etileno}} \cdot 100$$

$$\text{Metano (CH}_4\text{)}(\%) = \frac{20 \mu\frac{\text{L}}{\text{L}}}{20 \mu\frac{\text{L}}{\text{L}} + 10 \mu\frac{\text{L}}{\text{L}} + 10 \mu\frac{\text{L}}{\text{L}}} \cdot 100 = 50\%$$

$$\text{Etileno (C}_2\text{H}_4\text{)}(\%) = \frac{\mu\text{L/L Etileno}}{\mu\text{L/L Metano} + \mu\text{L/L Acetileno} + \mu\text{L/L Etileno}} \cdot 100$$

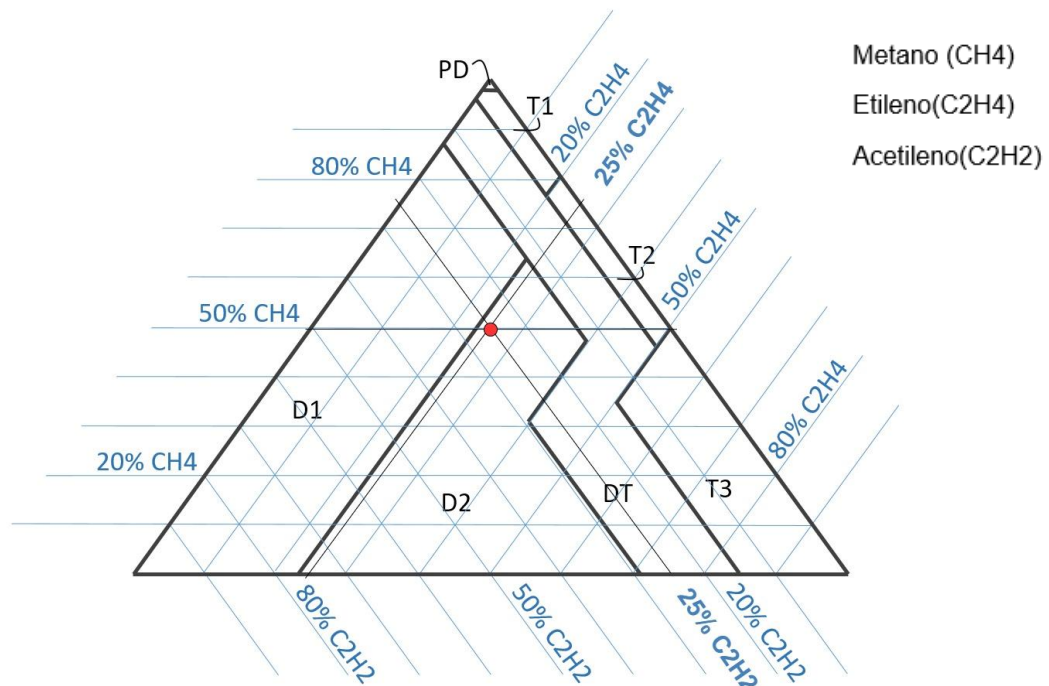
$$\text{Etileno (CH}_4\text{)}(\%) = \frac{10 \mu\frac{\text{L}}{\text{L}}}{20 \mu\frac{\text{L}}{\text{L}} + 10 \mu\frac{\text{L}}{\text{L}} + 10 \mu\frac{\text{L}}{\text{L}}} \cdot 100 = 25\%$$

$$\text{Acetileno (C}_2\text{H}_2\text{)}(\%) = \frac{\mu\text{L/L Acetileno}}{\mu\text{L/L Metano} + \mu\text{L/L Acetileno} + \mu\text{L/L Etileno}} \cdot 100$$

$$\text{Acetileno (CH}_4\text{)}(\%) = \frac{10 \mu\frac{\text{L}}{\text{L}}}{20 \mu\frac{\text{L}}{\text{L}} + 10 \mu\frac{\text{L}}{\text{L}} + 10 \mu\frac{\text{L}}{\text{L}}} \cdot 100 = 25\%$$

Assim pode-se observar que as concentrações relativas dos gases Metano (CH₄), Etileno(C₂H₄) e Acetileno(C₂H₂) são respectivamente 50%, 25% e 25%. Utilizando estes valores no triângulo de Duval é possível verificar uma possível região de falha, como segue:

Figura 14 - Exemplo de aplicação do triângulo de Duval



Fonte: Próprio autor

Acima podemos ver os valores aplicados no triângulo de Duval, onde nos representaria uma falha na região de D2.

Os possíveis diagnósticos podem ser encontrados na tabela abaixo retirada de (IEEE C57. 104, 2019):

Tabela 2 - Zonas de falha do triângulo Duval.

PD	Descargas parciais (Corona), podem causar danos ao longo do tempo no material isolante.
D1	Descargas de baixa energia, podendo causar carbonização do papel ou faíscas em conexões.
D2	Descargas de alta energia, podem causar a carbonização e furos no papel isolante, fusão de metais nas conexões, carbonização do óleo ou até desligamento do ativo por altas correntes de fuga.
T1	Indica presença de altas temperaturas até 300°C
T2	Indica presença de altas temperaturas acima de 300°C e abaixo de 700°C

T3	Indica aumento da temperatura acima de 700°C
DT	Indica uma combinação de falhas elétricas e térmicas, que podem acelerar a degradação tanto do papel quanto do óleo isolante

Fonte: (IEEE C57. 104, 2019)

Assim, o exemplo nos apresenta uma possível falha no transformador, podendo encontrar descargas de alta energia que podem danificar severamente o material isolante do interior do equipamento.

3. RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados de algumas análises de gases dissolvidos realizadas em um transformador elevador com potência nominal de aproximadamente 6MVA instalado em uma usina fotovoltaica, abrangendo o período de julho de 2023 a maio de 2024. Na Tabela 3, encontram-se as quatro análises mais recentes, evidenciando a evolução de determinados gases que podem comprometer o funcionamento adequado do equipamento.

Tabela 3 - Valores da concentração nas análises de gases dissolvidos.

Dissolved Gas Analysis

Lab report number	774962	767894	755575	736117	730525	
Sample date	2024-07-26	2024-05-14	2023-12-19	2023-08-18	2023-07-06	
Sample temp				30	22	°C
Hydrogen (H2)	7	4832 ^{*^^^!}	1420 ^{*^}	1250 ^{*^^+++!}	17	µL/L
Methane (CH4)	0.0	163.0 ^{!*}	80.0 [!]	50.0	99.0 [!]	µL/L
Ethane (C2H6)	0.0	86.0 ^{!*}	23.0	25.0	105.0 ^{*^!}	µL/L
Ethylene (C2H4)	0.0	51.0 ^{!*}	17.0	22.0	285.0 ^{*^^^!}	µL/L
Acetylene (C2H2)	1.0	113.0 ^{*^^^!}	41.0 [*]	56.0 ^{*^^^+++!}	0.0	µL/L
Carbon Monoxide (CO)	3	512 ^{*^^^!}	197~	174~	425 ^{*^^^!}	µL/L
Carbon Dioxide (CO2)	170	3270 [*]	3320 [*]	3130 [*]	7610 ^{*^^^!}	µL/L
Oxygen (O2)	3800	6300	4800	3500	12100 [*]	µL/L
Nitrogen (N2)	11700	53400	25200	31300	47300	µL/L

Fonte: Sistema de gestão interno da empresa

Legenda: (!) – Atenção; (*) - Nível Anormal; (+) - Taxa anormal; (^) - Aumento Anormal;

Para melhor compreensão, os valores da tabela acima representam a análise mais recente, primeira coluna da esquerda, para a análise mais antiga, última coluna a direita, assim sendo a primeira coluna representa os valores de concentração dos gases, após a manutenção do transformador.

Abaixo, na Tabela 4, os valores foram reescritos em ordem cronológica:

Tabela 4 - Valores da concentração nas análises de gases dissolvidos em ordem cronológica.

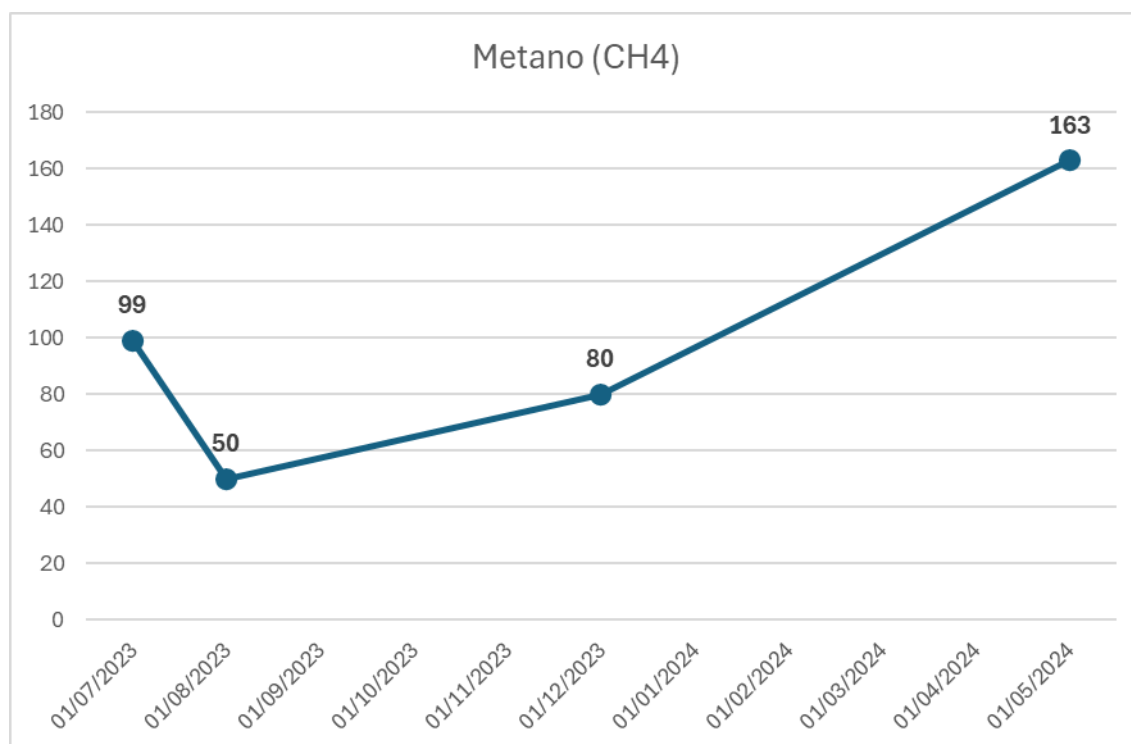
Data Gases	06/07/2023	18/08/2023	19/12/2023	14/05/2024	14/05/2024
Hidrogênio (H ₂)	17 µL/L	1250 µL/L	1420 µL/L	4832 µL/L	7 µL/L
Metano (CH ₄)	99 µL/L	50 µL/L	80 µL/L	163 µL/L	0 µL/L
Etano (C ₂ H ₆)	105 µL/L	25 µL/L	23 µL/L	86 µL/L	0 µL/L
Etileno (C ₂ H ₄)	285 µL/L	22 µL/L	17 µL/L	51 µL/L	0 µL/L
Acetileno (C ₂ H ₂)	0 µL/L	56 µL/L	41 µL/L	113 µL/L	1 µL/L
CO	425 µL/L	174 µL/L	197 µL/L	512 µL/L	3 µL/L
CO ₂	7610 µL/L	3130 µL/L	3320 µL/L	3270 µL/L	170 µL/L
Oxigênio (O ₂)	12100 µL/L	3500 µL/L	4800 µL/L	6300 µL/L	3800 µL/L
Nitrogênio (NO ₂)	47300 µL/L	31300 µL/L	25200 µL/L	53400 µL/L	11700 µL/L

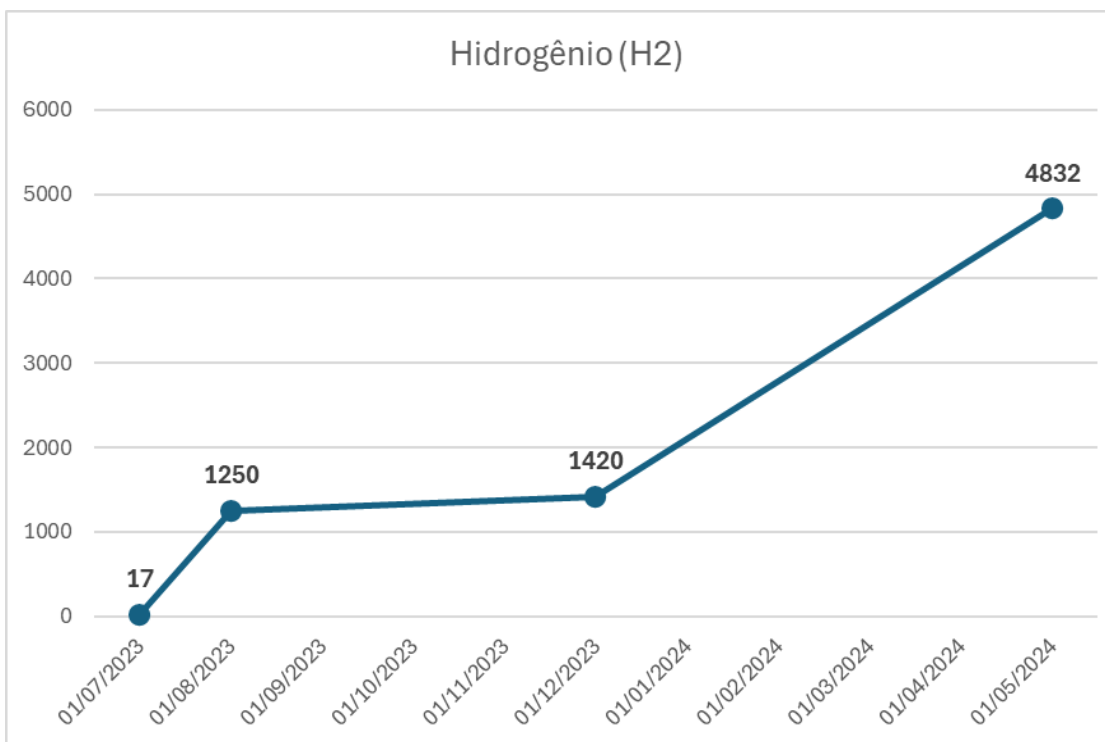
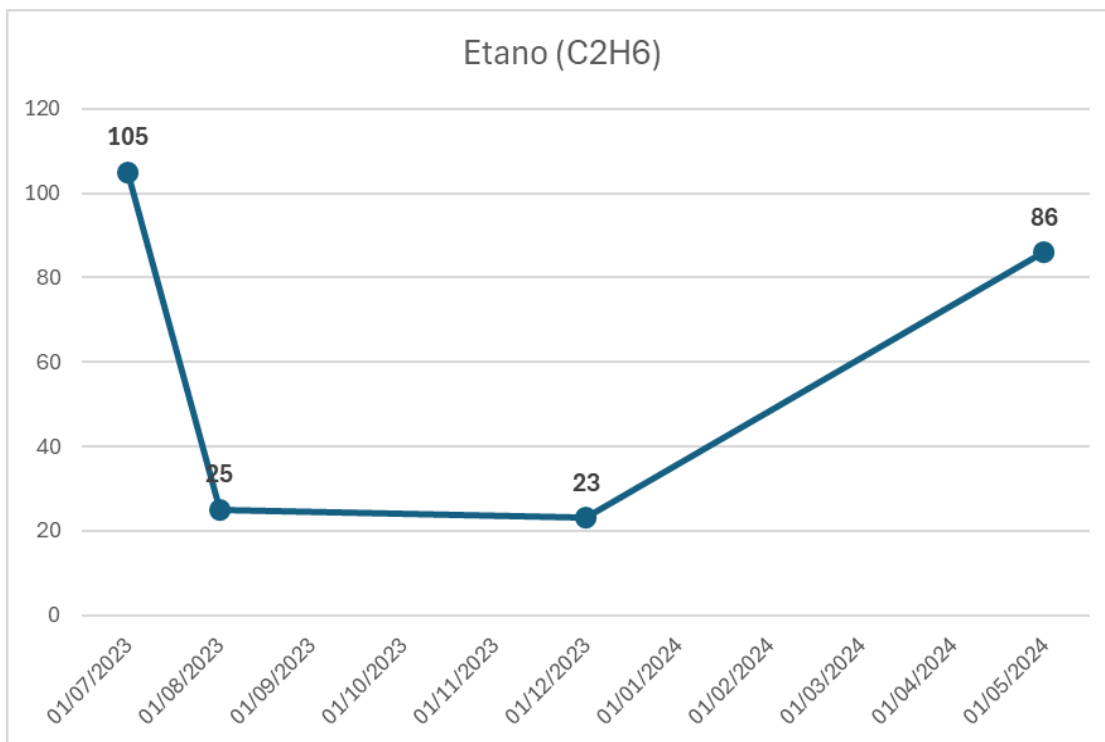
Fonte: Autor

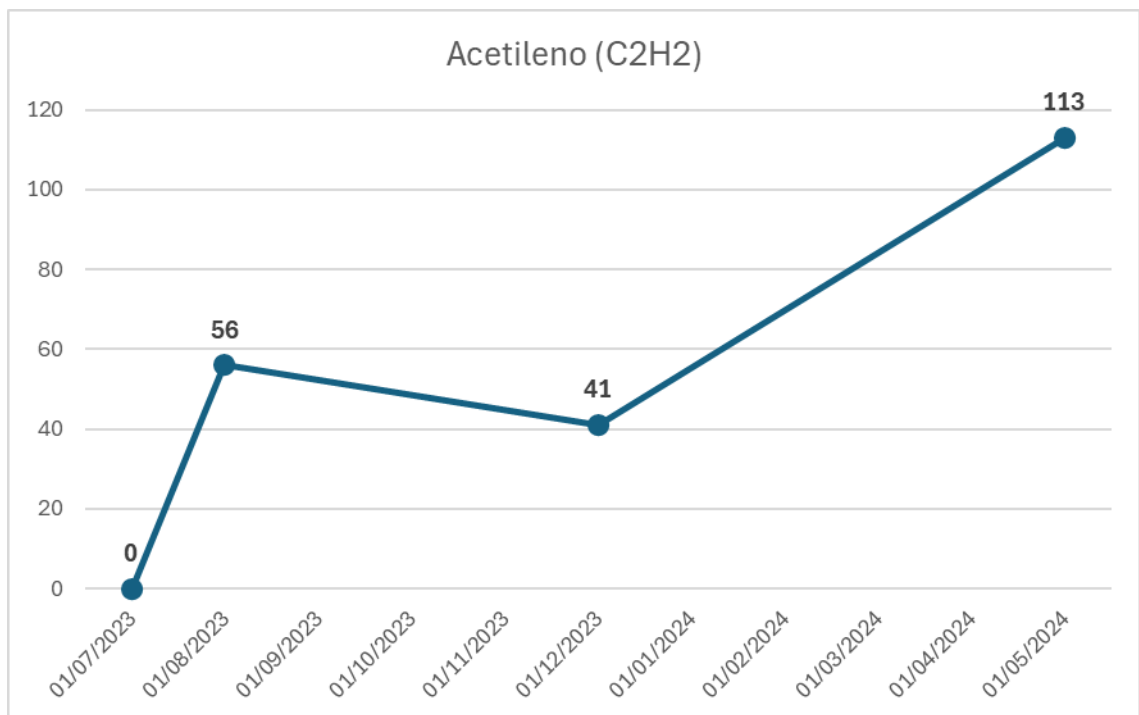
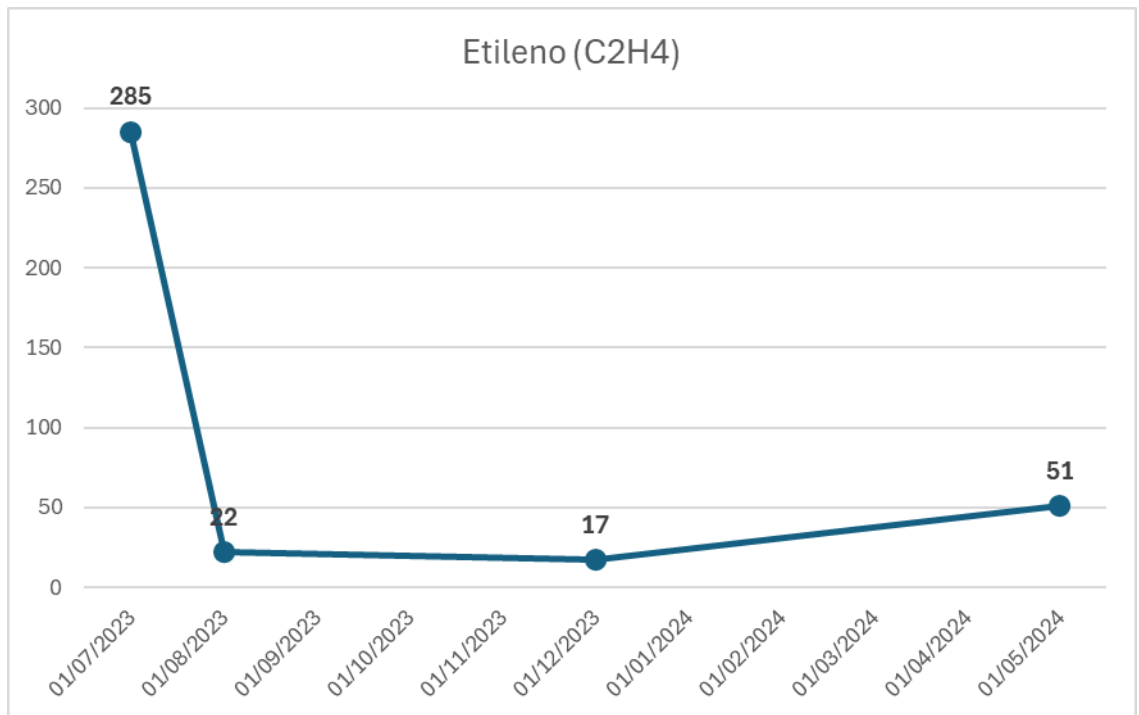
Para uma visualização mais clara, os dados acima foram transferidos para um gráfico, onde é possível verificar a evolução na concentração destes gases presentes no óleo isolante que estava sendo utilizado por este transformador, conforme

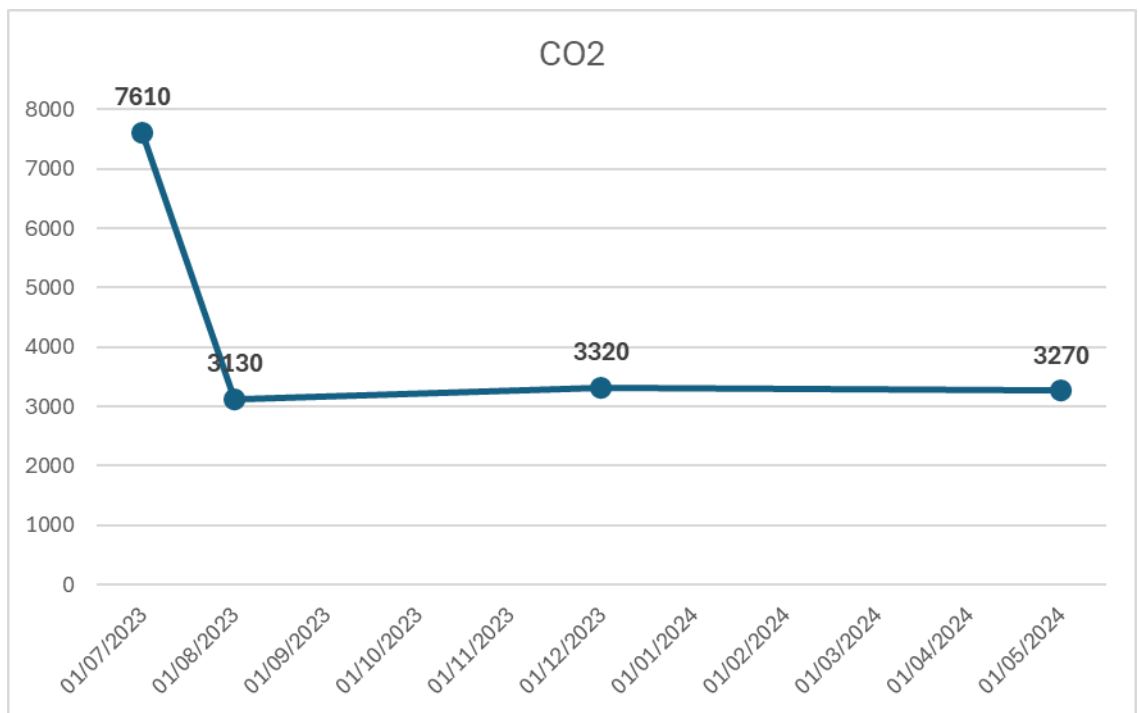
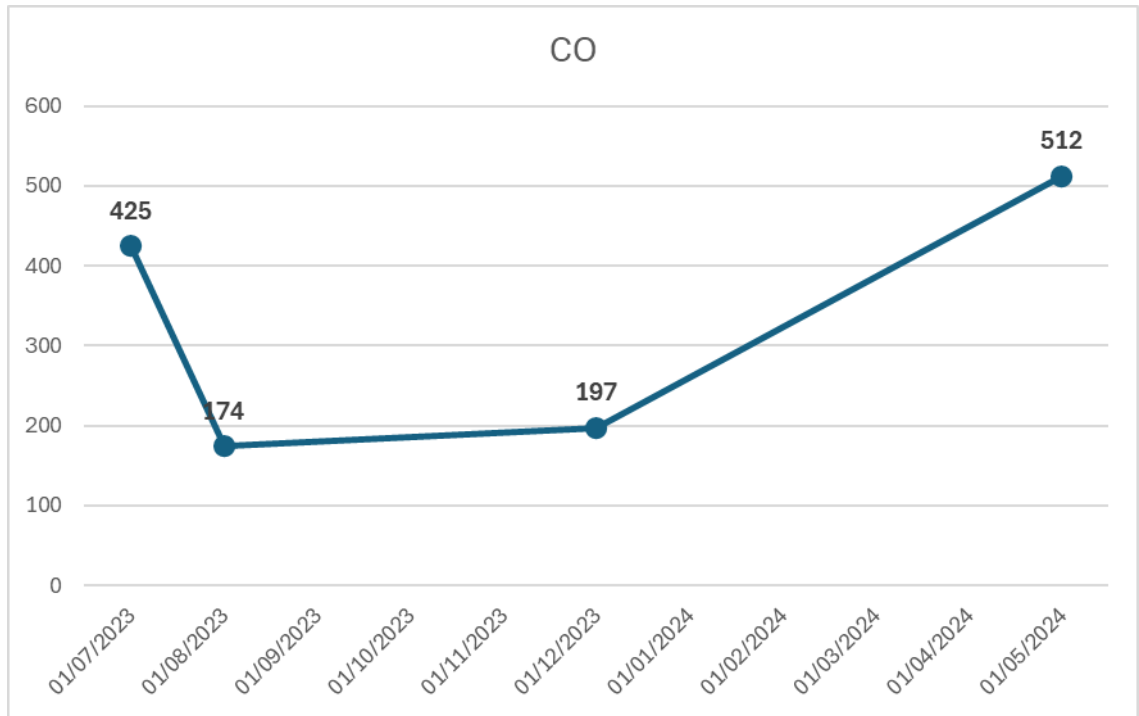
Figura 15:

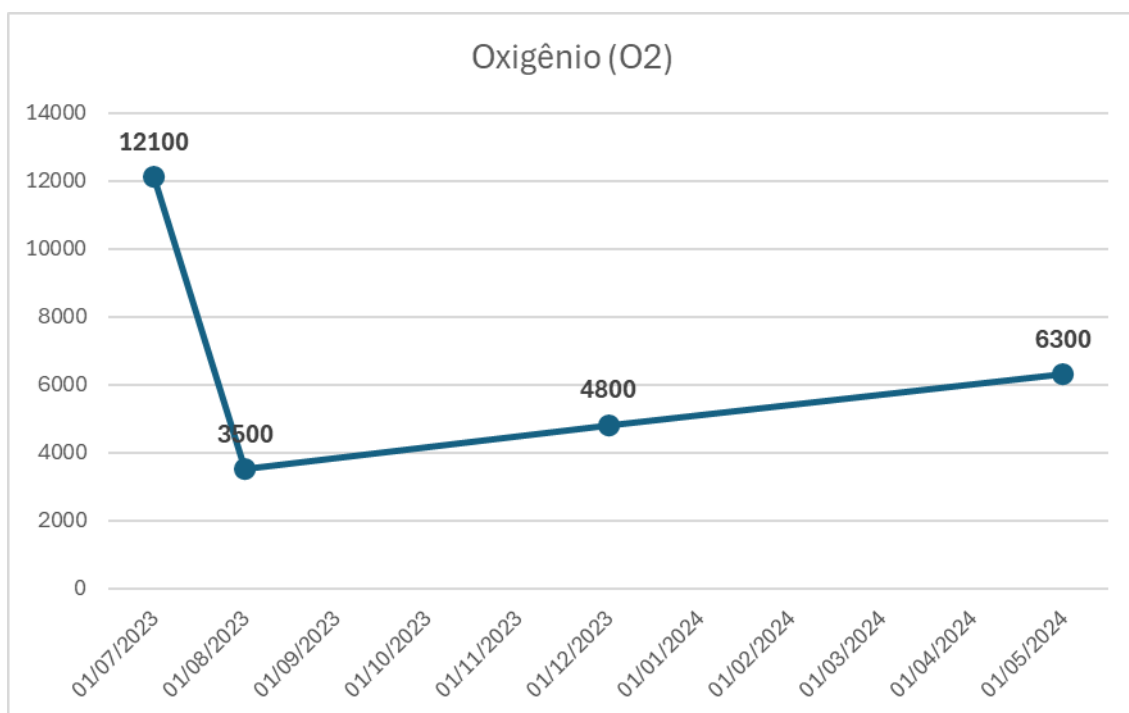
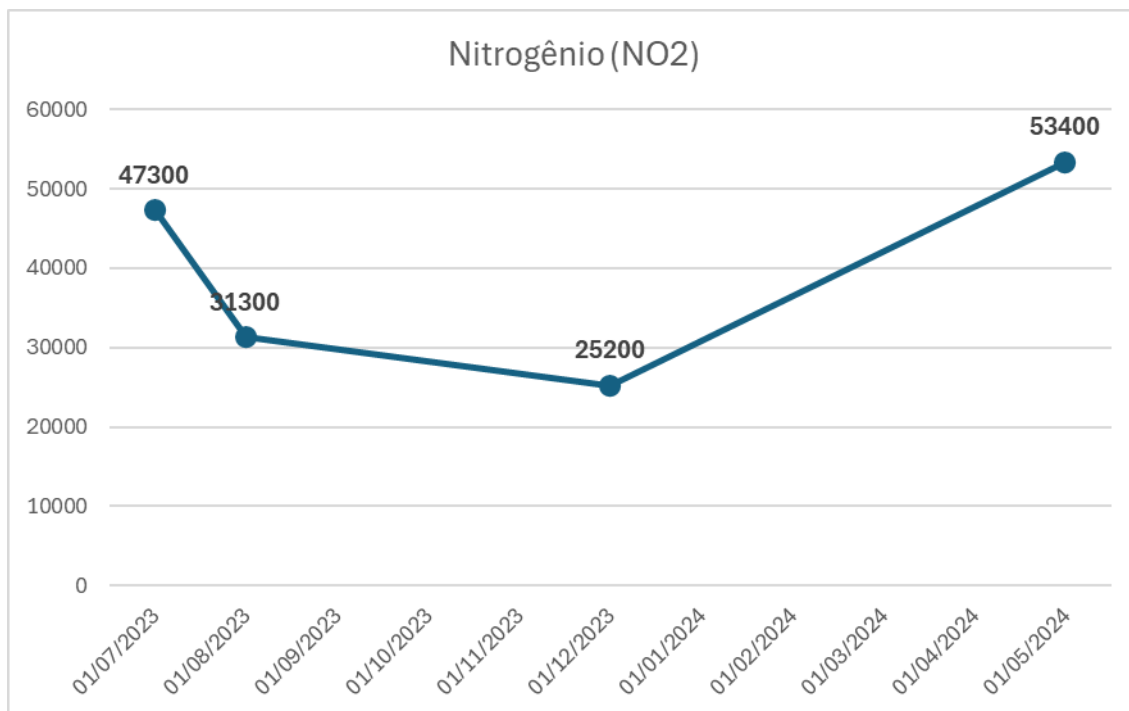
Figura 15 - Evolução da concentração de cada gás obtido via análise cromatográfica no período de julho de 2023 a maio de 2024











Fonte: Próprio autor.

A análise dos gráficos revela uma evolução significativa em alguns gases ao longo do período, destacando-se o metano (CH₄), o acetileno (C₂H₂) e o Hidrogênio (H). Conforme discutido anteriormente e de acordo com Duval estes gases podem indicar possíveis falhas térmicas ou elétricas no interior do equipamento.

A seguir, os valores obtidos em cada análise realizada durante o período serão aplicados em exemplos do Triângulo de Duval, possibilitando identificar as possíveis falhas apontadas pelo método.

Neste caso como utilizamos o triângulo de Duval 1 os gases analisados serão metano (CH₄), etileno (C₂H₄) e acetileno (C₂H₂).

Iniciaremos avaliando os dados da análise de gases dissolvidos realizada em 6 de julho de 2023. Nesta data, as concentrações absolutas de metano (CH₄), etileno (C₂H₄) e acetileno (C₂H₂) foram, respectivamente, 99 µL/L, 285 µL/L e 0 µL/L.

Para calcular a concentração relativa de cada gás respectivamente utilizou-se a equação (5).

$$\text{Metano (CH}_4\text{)}(\%) = \frac{\mu\text{L/L Metano}}{\mu\text{L/L Metano} + \mu\text{L/L Acetileno} + \mu\text{L/L Etileno}} \cdot 100$$

$$\text{Etileno (C}_2\text{H}_4\text{)}(\%) = \frac{\mu\text{L/L Etileno}}{\mu\text{L/L Metano} + \mu\text{L/L Acetileno} + \mu\text{L/L Etileno}} \cdot 100$$

$$\text{Acetileno (C}_2\text{H}_2\text{)}(\%) = \frac{\mu\text{L/L Acetileno}}{\mu\text{L/L Metano} + \mu\text{L/L Acetileno} + \mu\text{L/L Etileno}} \cdot 100$$

Para facilitar os cálculos inicialmente encontra-se o valor da soma de todas as amostras:

$$\mu\text{L/L Metano} + \mu\text{L/L Acetileno} + \mu\text{L/L Etileno} = 99 + 285 + 0 = 384$$

Utilizando o valor encontrado acima pode-se calcular a concentração de cada gás, sendo:

$$\text{Metano (\%)(CH}_4\text{)} = \frac{99}{384} \cdot 100 = 25,78\%$$

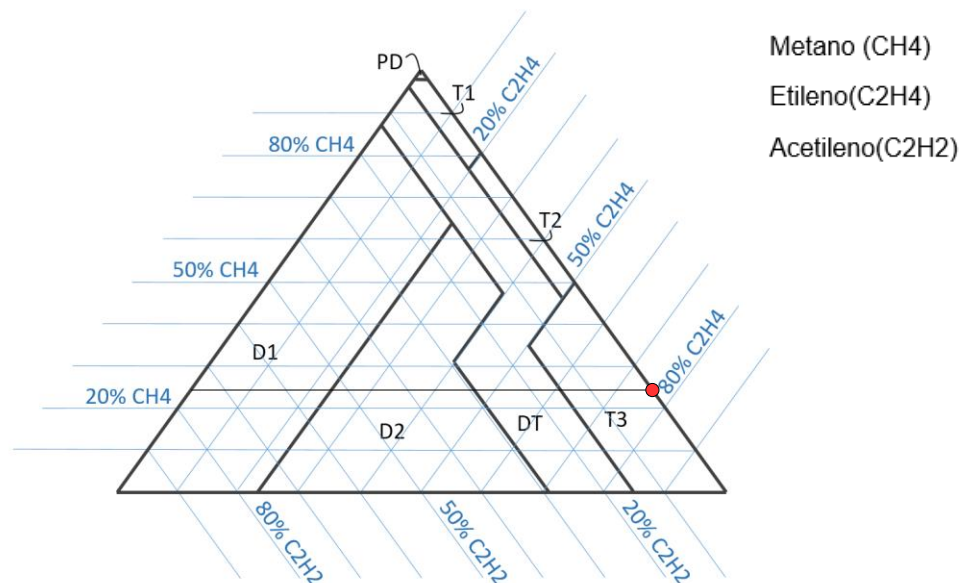
$$\text{Etileno (C}_2\text{H}_4\text{)}(\%) = \frac{285}{384} \cdot 100 = 74,21\%$$

$$\text{Acetileno (C}_2\text{H}_2\text{)}(\%) = \frac{0}{384} \cdot 100 = 0\%$$

Portanto a partir dos cálculos acima é possível calcular a concentração de cada gás presente na amostra avaliada, e assim é possível plotar os valores no triângulo de Duval e obter a possível falha que estes gases apresentem.

Como é possível notar no ponto vermelho da Figura 16, a concentração relativa de gases indica, a partir do método de Duval, a área T3 que é um indicativo de altas temperaturas no interior do equipamento.

Figura 16 - Triângulo de Duval análise de gases dissolvidos de 06 de julho de 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor

Por este motivo, a periodicidade de seis meses normalmente adotada para realização de uma nova inspeção não foi obedecida, e a fim de obter uma confirmação do resultado informado pelo método de Duval, uma nova análise foi realizada um mês após a primeira análise, para que pudesse ser constatada essa possível falha.

Assim sendo, em 18 de agosto de 2023 uma nova coleta foi realizada e enviada ao laboratório, a fim de confirmar se tais gases iriam evoluir, demonstrando que a falha de altas temperaturas no interior do equipamento se confirmaria, ou se, a análise indicou um falso positivo para altas temperaturas. A nova análise de gases dissolvidos retornou os seguintes valores:

metano (CH4) 50µL/L, etileno (C2H4) 22µL/L e o acetileno (C2H2) indicou uma concentração de 56µL/L.

Realizando novamente os cálculos utilizando a equação (5):

$$\mu\text{L/L Metano} + \mu\text{L/L Acetileno} + \mu\text{L/L Etileno} = 50 + 22 + 56 = 128$$

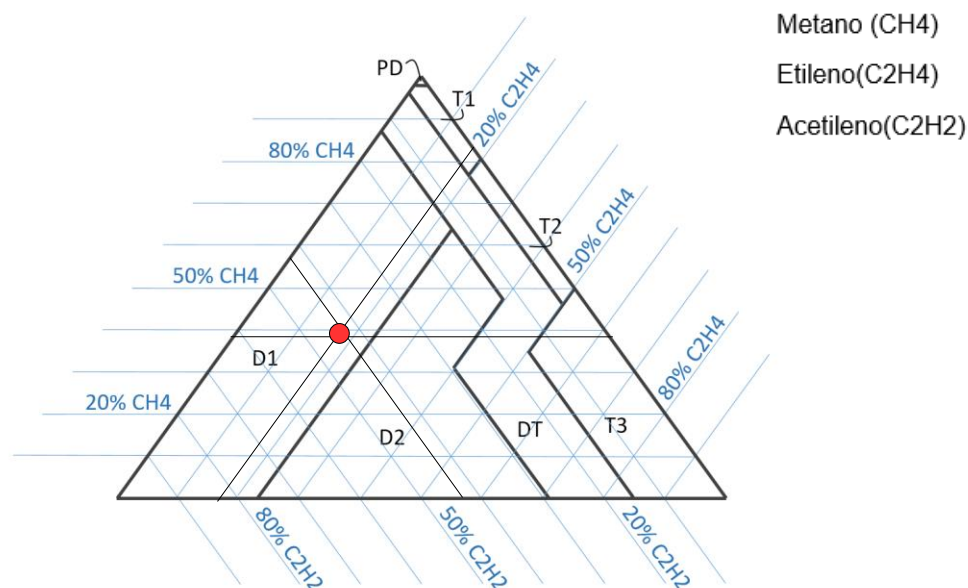
$$\text{Metano (CH}_4\text{)}(\%) = \frac{50}{128} \cdot 100 = 39,06\%$$

$$\text{Etileno (C}_2\text{H}_4\text{)}(\%) = \frac{22}{128} \cdot 100 = 17,18\%$$

$$\text{Acetileno (C}_2\text{H}_2\text{)}(\%) = \frac{56}{128} \cdot 100 = 43,75\%$$

A partir dos cálculos acima soube-se a concentração de cada gás presente na amostra avaliada, e assim é possível plotar os valores no triângulo de Duval e obter a possível falha que está nova coleta apresenta:

Figura 17 - Triângulo de Duval análise de gases dissolvidos de 18 de agosto de 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor

A falha, anteriormente classificada como térmica, agora foi reclassificada como elétrica como pode-se observar na Figura 17. Devido à diminuição das concentrações da maioria dos gases, optou-se por ampliar o intervalo entre as análises, com o objetivo de monitorar o surgimento de novos gases. No entanto, é importante destacar que a concentração de acetileno (C₂H₂) permanece como um indicador preocupante, visto que a concentração absoluta deste gás em um equipamento saudável deve ser próxima a zero. Apesar disso, a redução dos outros gases justificou a decisão de manter o equipamento em operação por mais um período.

Uma nova análise foi realizada em 19 de dezembro de 2023 para monitorar o comportamento do acetileno (C_2H_2). Os resultados dessa coleta foram: metano (CH_4) 80 $\mu L/L$, etileno (C_2H_4) 17 $\mu L/L$ e acetileno (C_2H_2) 41 $\mu L/L$.

Nota-se que, embora os valores de etileno e acetileno tenham diminuído, o metano apresentou um leve aumento em sua concentração. Utilizando (5), os valores normalizados para plotagem no Triângulo de Duval foram calculados como:

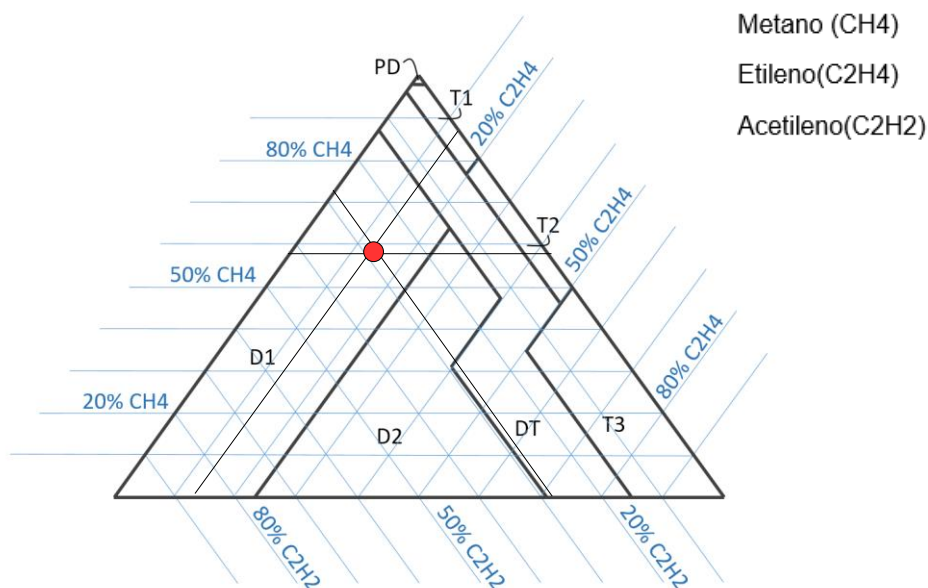
$$\mu L/L \text{ Metano} + \mu L/L \text{ Acetileno} + \mu L/L \text{ Etileno} = 80 + 17 + 41 = 138$$

$$\text{Metano } (CH_4)(\%) = \frac{80}{138} \cdot 100 = 57,97\%$$

$$\text{Etileno } (C_2H_4)(\%) = \frac{17}{138} \cdot 100 = 12,31\%$$

$$\text{Acetileno } (C_2H_2)(\%) = \frac{41}{138} \cdot 100 = 29,71\%$$

Figura 18 - Triângulo de Duval análise de gases dissolvidos de 19 de dezembro de 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor

Novamente, como pode-se notar na Figura 18, obtemos um resultado que indica descargas parciais no interior do equipamento, porém como citado anteriormente, o acompanhamento da concentração dos gases também deve ser levado em consideração, e como houve uma redução na evolução dos gases novamente a decisão tomada foi de manter o equipamento em operação, visto que apenas o Metano (CH_4) dentre os três gases, aumentou a concentração.

Devido a diminuição na concentração dos demais gases, definiu-se como estratégia de gestão deste ativo, mantê-lo em funcionamento normal e realizar a próxima coleta dentro do período de seis meses.

Sendo assim, uma nova análise foi realizada em 14 de maio de 2024, onde as seguintes concentrações absolutas foram obtidas:

- Metano (CH₄) 163 µL/L
- Etileno (C₂H₄) 51 µL/L e
- Acetileno (C₂H₂) 113 µL/L.

Avaliando esses valores de acordo com a equação (5):

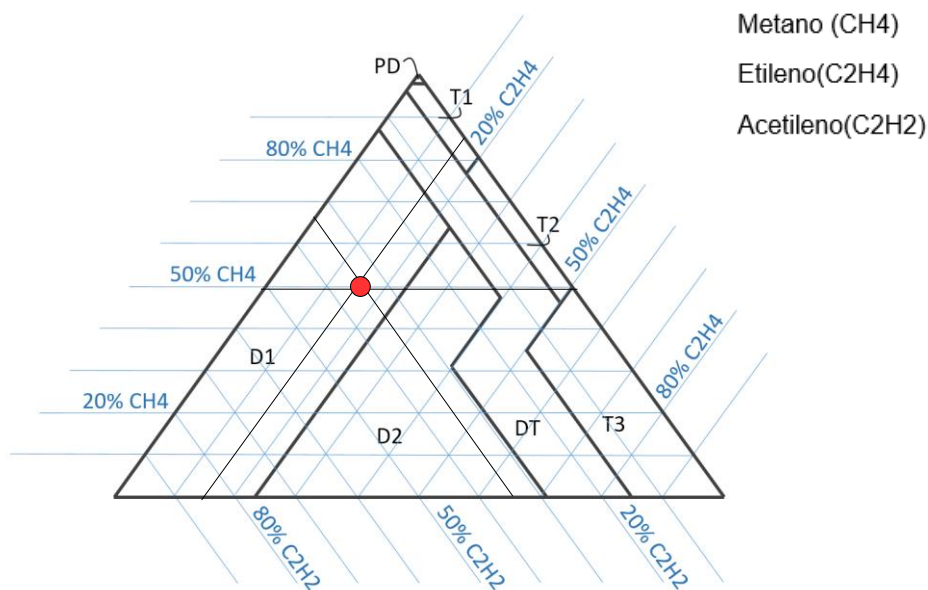
$$\mu\text{L/L Metano} + \mu\text{L/L Acetileno} + \mu\text{L/L Etileno} = 163 + 51 + 113 = 327$$

$$\text{Metano (CH}_4\text{)(\%)} = \frac{163}{327} \cdot 100 = 49,84\%$$

$$\text{Etileno (C}_2\text{H}_4\text{)(\%)} = \frac{51}{327} \cdot 100 = 15,59\%$$

$$\text{Acetileno (C}_2\text{H}_2\text{)(\%)} = \frac{113}{327} \cdot 100 = 34,55\%$$

Figura 19 – Triângulo de Duval análise de gases dissolvidos de 14 de maio de 2024.



Fonte: Elaborado pelo autor

Novamente a concentração dos gases, quando aplicadas ao método de Duval apresentou possíveis descargas parciais de baixa energia no interior do equipamento.

A partir desta análise, a empresa responsável pela gestão do equipamento decidiu retirá-lo de funcionamento e levá-lo à manutenção, a fim de analisar o estado dos sistemas internos do equipamento.

Desta forma o transformador permaneceu fora de operação no período de maio até julho de 2024 quando foi enviado para manutenção. Onde foi possível obter fotografias internas do equipamento em questão durante sua manutenção corretiva.

Figura 20 - Desgastes do condutor que conecta o primário às bobinas do Transformador Elevador.



Fonte: Do próprio Autor

Como pode-se verificar na

Figura 20 os indicativos de descargas parciais de baixa energia estavam corretos. Devido ao desgaste do cabo e a alta corrente elétrica conduzida por este condutor, algumas descargas ocorriam entre os filamentos do condutor, gerando os gases que avaliamos na análise de gases dissolvidos.

Figura 21 - Indícios de papel queimado no Transformador Elevador.

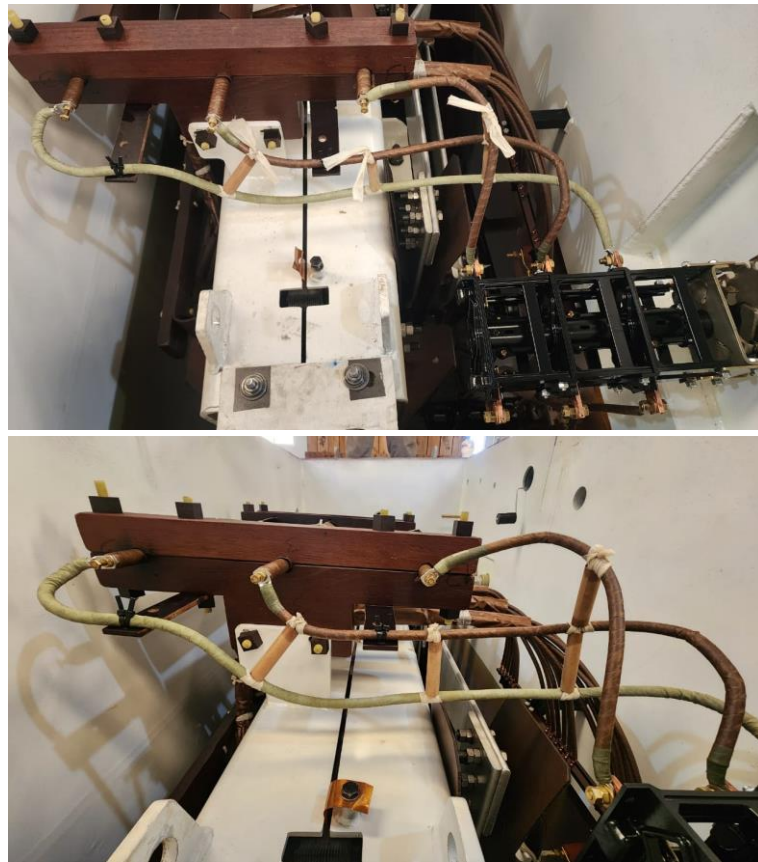


Fonte: Do próprio Autor

Também foram identificados indícios de queima no papel isolante, como indica a Figura 21 o que corrobora a avaliação inicial indicada na região T3 do Triângulo de Duval. Diante dos defeitos constatados, os conectores danificados foram substituídos e o material isolante queimado foi trocado por um novo.

Como uma forma de aumentar a confiabilidade das novas conexões instaladas, foram adicionados separadores de madeira entre os conectores, garantindo a isolação interna do equipamento. Esses separadores ajudam a evitar que o torque provocado pela curvatura dos cabos volte a comprometer as conexões.

Figura 22 – Conexões do transformador restauradas após manutenção.



Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 23 - Visão geral do transformador após manutenção.



Fonte: Elaborada pelo autor

Como é possível verificar nas Figura 22 e Figura 23 as conexões entre cabo e conector foram refeitas, o material isolante utilizado para proteger o cabo foi reforçado nas extremidades, garantindo maior confiabilidade para o equipamento.

Após o fim da manutenção corretiva, uma nova análise foi realizada em 26 de julho de 2024, como nota-se na Tabela 3, as concentrações absolutas de metano (CH_4), etileno (C_2H_6) e acetileno (C_2H_2) foram respectivamente, $0\mu\text{L/L}$, $0\mu\text{L/L}$ e $1\mu\text{L/L}$, comprovando a teoria de que os gases são gerados no interior do equipamento a partir de possíveis falhas que existam em seu interior, e reforçando a tese de que quanto menor a presença destes gases melhor a saúde do transformador.

4. CONCLUSÃO

Como pode-se verificar ao longo de todo o trabalho, a monitoração regular dos transformadores via análise de gases mostrou-se essencial como ferramenta de prevenção. A não execução destes testes pode acarretar falhas graves e em alguns casos irreversíveis no equipamento. No exemplo prático apresentado, pudemos validar que os diagnósticos indicados nas análises do óleo isolante foram fundamentais no processo de antecipar potenciais falhas graves.

Conforme evidenciado ao longo do estudo, o monitoramento das concentrações individuais de cada gás deve ser realizado com atenção criteriosa. Durante três análises consecutivas, os resultados indicaram falhas na região D1 do Triângulo de Duval, porém a decisão de interromper a operação do transformador foi tomada somente após a terceira análise. Essa decisão foi fundamentada no aumento significativo das concentrações de Metano (CH_4) e Acetileno (C_2H_2), que apresentaram uma evolução superior a 100% em relação à amostra anterior.

O processo de análise de gases em óleo isolante feito em um laboratório especializado gera um custo marginal quando comparado aos valores necessários para a reparação de um transformador (ou em casos mais graves a perda total do equipamento), que geraria um custo significativamente maior, para realizar a substituição do ativo. Atualmente no mercado uma análise cromatográfica custa em média de 200 a 500 reais, e como pudemos observar um acompanhamento semestral gera resultados satisfatórios para um diagnóstico preciso do estado atual do equipamento, com baixos custos.

As manutenções preventivas do transformador também podem, e devem ser executadas na parte externa do equipamento, inspeção regular das conexões, ensaios elétricos de conexão à terra, isolamento de buchas de conexão de baixa e alta tensão, ensaio de verificação da isolação de bobinas entre outras avaliações podem melhorar a capacidade preditiva na análise de possíveis falhas, aumentando ainda mais a confiabilidade dos equipamentos transformadores.

5. REFERÊNCIAS

ASTM INTERNATIONAL. **Norma ASTM D - 3612**: 02. 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA: [s.n.].

CHEMISTRY NET. **Understanding Columns in Gas Chromatography**. Disponível em: <<https://chem-net.blogspot.com/2013/07/understanding-columns-in-gas-chromatography.html>>. Acesso em: 27 out. 2024.

DR. ALEXANDER ALBER. **The Duval triangle explained in 3 minutes**. Disponível em: <<https://www.reinhausen.com/the-duval-triangle-explained-in-3-minutes>>. Acesso em: 19 out. 2024.

DUVAL, M. Dissolved gas analysis: It can save your transformer. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 5, n. 6, p. 22–27, 1989.

IEEE C57. 104. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. **IEEE Std C57.104-2019 (Revision of IEEE Std C57.104-2008)**, p. 1–98, 2019.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. Principles of instrumental analysis seventh edition. **Cengage learning**, 2018.

TIAGO REIS. **SIN: entenda como funciona o Sistema Interligado Nacional**. Disponível em: <<https://www.suno.com.br/artigos/sistema-interligado-nacional/>>. Acesso em: 16 out. 2024.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7**. [s.l.] AMGH Editora, 2014.