

DIAGNÓSTICOS DE GASES EM ÓLEO ISOLANTE DE REGULADORES E TRANSFORMADORES

GAS DIAGNOSTICS IN INSULATING OIL OF REGULATORS AND TRANSFORMERS

Lucas Silva Toledo XXXX¹Marcos Rosa dos Santos XXXXXX²Valdomiro Vega Garcia XXXXXX³

Resumo – Os reguladores de tensão são autotransformadores monofásicos usados para ajustar os níveis de tensão na rede elétrica primária. A regulação é realizada por meio de chaves internas imersas em óleo isolante, controladas por relés. Durante a comutação de carga, podem ocorrer pequenos arcos elétricos que podem danificar os contatos internos e o óleo isolante, reduzindo a vida útil do equipamento.

O projeto busca monitorar e diagnosticar os gases dissolvidos no óleo isolante dos reguladores de tensão usando técnicas de análise de gases dissolvidos (DGA). Isso envolve a coleta de amostras de óleo, a comparação entre os valores coletados e os valores estabelecidos pela norma IEEE, garantindo a confiabilidade do sistema. Além disso, é empregado o método de Monte Carlo, uma técnica matemática que prevê possíveis resultados de um evento incerto. Consequentemente, é possível prever estados futuros, facilitando uma manutenção preventiva mais assertiva e prolongando a vida útil do equipamento.

Palavras-chave: Regulador de tensão. Óleo isolante. Gases dissolvidos.

Abstract - Voltage regulators are single-phase autotransformers used to adjust voltage levels in the primary power grid. Regulation is carried out using internal switches immersed in insulating oil, controlled by relays. During load switching, small electrical arcs may occur that can damage the internal contacts and the insulating oil, reducing the useful life of the equipment.

The project seeks to monitor and diagnose the gases dissolved in the insulating oil of voltage regulators using dissolved gas analysis (DGA) techniques. This involves the collection of oil samples, comparisons between the values collected and the values established by the IEEE standard, ensuring the reliability of the system, and the Monte Carlo method, which is a mathematical technique that predicts possible results of an uncertain event. Additionally, the Monte Carlo method, a mathematical technique that predicts possible results of an uncertain event, is employed. Consequently, it is possible to predict future states, facilitating more accurate preventive maintenance and extending the useful life of the equipment.

¹ Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistema Elétrico de Potência (Mackenzie/Higienópolis-SP); Técnico de Distribuição na EDP SP. Contato: lucas.stoledo@hotmail.com.

² Pós-Doutorado em Sistemas de Potência (USP); Especialista em Transmissão e Distribuição de Energia; Coordenador no curso de Engenharia Elétrica (UNIP); Docente na Escola de Engenharia (IPM). Contato: marcos.rosa@mackenzie.br.

³ Pós-Doutorado em Engenharia Elétrica (UFABC); Pesquisador Doutor (ITAEE); Especialista Cientista de Dados na área de Operação e Manutenção (ENEL); Docente na Escola de Engenharia (IPM). Contato: valdomirovega@hotmail.com.

Keywords: *Voltage regulator. Insulating oil. Dissolved gases.*

I. INTRODUÇÃO

Os reguladores de tensão instalados na rede de distribuição são autotransformadores monofásicos, responsáveis por elevar ou abaixar os níveis de tensão da rede primária de energia. Segundo COSTA, Leonardo. L.; MELO, Kayck. H. P. (2019) afirmam que:

“[...] o princípio de funcionamento do regulador é similar à de um autotransformador, com acoplamento magnético entre o enrolamento primário e o enrolamento secundário seguido de um acoplamento elétrico, ou seja, o autotransformador pode ser abaixador, elevador, e regulador de tensão.”

Estes equipamentos são utilizados em extensos alimentadores em que há a necessidade de elevar a tensão por conta das perdas técnicas devido a grandes distâncias do trecho, e por conta das perdas não técnicas resultantes dos desvios irregulares de energia. Os níveis de tensão na saída são controlados por relés e a regulação se faz por meio de comutadores internos imersos ao óleo isolante, e durante as comutações em carga podem gerar pequenos arcos elétricos que podem deteriorar e diminuir a vida útil dos contatos elétricos e do óleo isolante.

Além disso, esses equipamentos estão instalados em sistemas aéreos de distribuição de energia localizados em trechos principais, mais conhecidos como “tronco”. Trecho do circuito principal que liga a saída da Estação Transformadora de Distribuição (ETD) até a carga final do alimentador e ao longo desse trecho é conectados todos os ramais (derivações) de circuitos radiais com e sem recurso.

Logo, ao desligar um regulador de tensão indevidamente ou ter um mau funcionamento, há muitos clientes afetados, seja por interrupção ou por tensão precária ou crítica, trazendo grandes prejuízos para a concessionária de energia elétrica.

A análise e diagnóstico do óleo isolante pode ser feito por um método chamado Dissolved Gas Analysis (DGA) por meio de coletas de amostras do líquido isolante. Este método analisa as concentrações de gases-chave, principais proporções de gás, e representações gráficas sendo capaz de fornecer informações cruciais sobre o funcionamento e a integridade de um transformador de potência imerso em óleo.

Ainda neste sentido DE SOUZA (2023) afirma que:

“A análise de amostras de óleo através da cromatografia permite a identificação dos níveis de cada gás, incluindo metano, etano, etileno, óxidos de carbono e acetileno. Essa identificação permite avaliar a condição do isolamento composto pelo conjunto papel/óleo mineral isolante e identificar possíveis falhas em andamento.”

Estes métodos são responsáveis por identificar sobrecarga, vazamentos, dielétrico do óleo, curto-circuito e estimativa da vida útil do equipamento.

Nos sistemas de transformadores de transmissão esses monitoramentos são utilizados nas subestações de energia, pois segundo a resolução ANEEL (2015) estabelece requisitos mínimos de manutenção para equipamentos da rede básica, incluindo a cromatografia de transformadores, com uma frequência máxima de 6 meses e uma tolerância mínima de 1 mês. Embora os transformadores sejam equipamentos altamente confiáveis com baixas taxas de falhas, são consideradas de baixa frequência,

porém de alta consequência. Explosões e incêndios podem resultar em fatalidades, danos catastróficos à propriedade e interrupção do serviço, acarretando custos significativos.

Contudo, os reguladores de tensão ficam em constante exposição às intempéries com risco frequente de deterioração e desgastes prematuros, assim como outros equipamentos instalados na rede de distribuição como banco de capacitores e transformadores. Por isso, se faz necessário uma análise periódica da qualidade do óleo isolante dos reguladores de tensão por meio de coletas de amostras do óleo com o intuito de aumentar a confiabilidade do equipamento com planos de manutenção mais precisos. Evitando assim, os desligamentos não programados e a deterioração total do óleo, contribuindo com o reaproveitamento do líquido e favorecendo com a sustentabilidade e meio ambiente.

II. METODOLOGIA

A partir destas situações, iniciou-se o desenvolvimento de pesquisas sobre as normas vigentes que tratam da amostragem do óleo de transformadores, interpretação da análise dos gases dissolvidos e a relação dos gases com os tipos de falhas características, sendo elas a NBR 7070, NBR 7274, IEC 60599, entre outras normas.

Os valores típicos observados na tabela 2 foram pesquisados mundialmente pela IEC e CIGRE incluindo mais de 20.000 equipamentos. Seus valores típicos dependem de diversos fatores como idade do equipamento, tipo, fabricante, clima e regime de operação. Por isso os valores dos gases dissolvidos no óleo dos equipamentos podem variar de região para região e o modo de operação na qual o equipamento foi submetido.

Além dos valores típicos fornecidos pela norma, é necessário calcular a curva característica para a rede de equipamentos elétricos em estudo para melhor precisão e identificação prévia de falhas.

Foram coletados dados de dois transformadores de subestação em operação de 88/13,8kV, ambos com o mesmo ano de fabricação (1978), mesma potência (15MVA), e ambos com capacidade em litros de óleo isolante de 20.250L.

O terceiro transformador analisado foi fabricado em 1982, também de 88/13,8kV com potência de 60MVA, e volume em litros de óleo isolante de 39.018L.

As amostras do óleo foram extraídas semestralmente por uma empresa especializada em análise e coleta do óleo isolante seguindo todos os protocolos de segurança e normas vigentes.

A partir das tabelas 1 e 2 localizadas no repositório do Github, confecciona-se as curvas características dos gases dissolvidos comparado com os valores típicos da norma IEC 60599.

Verifica-se nos gráficos da figura 1 que os gases dissolvidos nos transformadores em estudo estão abaixo do nível estabelecido pela IEC 60599. Porém, para o TR1, existem gases que estão acima da média dos outros equipamentos e acima do limite da norma. Para estes casos, é recomendada a coleta periódica do óleo e um acompanhamento aprimorado deste dispositivo para evitar um desligamento não programado e manutenções corretivas.

O aumento expressivo de certos gases pode indicar falhas no equipamento. Pode-se interpretar os dados obtidos nas tabelas e relacionar o tipo de falha com os gases dissolvidos, segundo a NBR 7274:2012.

Analisando os gases dissolvidos no TR1 que teve seu nível de Etano (C_2H_6) acima da média, e analisando também o total de gases combustíveis (TGC) que foi de

452 ppm classificado como nível médio, obtém-se os seguintes resultados com base nas tabelas 3 e 4:

Tabela 5 – Relação dos gases do TR1 pelo método de Rogers

TR1		
$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
NS	5,58	0,03
NS	4,86	0,05
NS	5,50	0,03
NS	4,43	0,02
NS	3,50	0,03

Fonte: Autores, 2024.

Não foi possível calcular a primeira coluna pois o valor esperado de acetileno foi abaixo do limite de detecção do método utilizado. Analisando a tabela percebe-se um valor alto da relação CH_4/H_2 caracterizando um sobreaquecimento e descargas parciais (DP), devido a relação $(C_2H_4/(C_2H_6))$ resultar em um número menor que 0,2.

Outras relações muito importantes para a identificação de defeitos envolvendo o papel isolante do tipo kraft comum e o contato do ar atmosférico com o óleo isolante são as relações de dióxido de carbono com monóxido de carbono e de oxigênio com nitrogênio. Essas relações identificam a degradação do papel isolante presente no núcleo do transformador e defeitos térmicos envolvendo o isolamento sólido.

Tabela 6 – Relação da degradação do papel isolante

TR1			
CO2 / CO	Valor esperado	O2 / N2	Valor esperado
10,21	3 - 11	0,06	> 0,3
7,85	3 - 11	0,12	> 0,3
22,27	3 - 11	0,07	> 0,3
18,47	3 - 11	0,03	> 0,3
18,08	3 - 11	0,19	> 0,3

Fonte: Adaptado de NBR 7274 (2012, p. 14)

Conforme os dados mostrados na tabela acima, a relação maior que 11 de monóxido de carbono indica uma evolução de defeito envolvendo o isolamento térmico.

A temperatura do isolamento sólido é o principal fator de envelhecimento do transformador. Esse isolamento, com a temperatura e o tempo, entra em um processo de despolimerização, provocando a degradação das propriedades mecânicas do papel, tais como a elasticidade e a resistência aos esforços de tração. Com isso, o papel se fragiliza, tornando-se quebradiço, não suportando os esforços de curto-circuito e as próprias vibrações do funcionamento do transformador, caracterizando o fim da vida útil do transformador.

Já na segunda relação, obtém-se um número inferior a 0,3 o que caracteriza um excessivo consumo de oxigênio. Portanto tem-se uma taxa maior de oxidação do óleo e consequentemente o envelhecimento acelerado do papel isolante.

Em vista disso, pode-se analisar os resultados obtidos do TR1 pelo método Triângulo de Duval. Conforme ANTUNES (2020), O Método do Triângulo de Duval utiliza três gases correspondentes ao aumento do conteúdo de energia ou temperatura de falhas: metano (CH₄) para falhas de baixa energia/temperatura, etileno (C₂H₄) para falhas de alta temperatura e acetileno (C₂H₂) para falhas de temperatura/energia/arco muito alta. Em cada lado do triângulo são plotadas as porcentagens relativas desses três gases:

$$P1 = 100 \times \frac{g1}{g1+g2+g3} \quad (1)$$

$$P2 = 100 \times \frac{g2}{g1+g2+g3} \quad (2)$$

$$P3 = 100 \times \frac{g3}{g1+g2+g3} \quad (3)$$

Em que:

P1 = Porcentagem de CH₄

P2 = Porcentagem de C₂H₄

P3 = Porcentagem de C₂H₂

g1 = CH₄ em ppm

g2 = C₂H₄ em ppm

g3 = C₂H₂ em ppm

Após o cálculo da porcentagem de cada gás na tabela 7. Obtém-se, por meio do software MATLAB, o triângulo de Duval, conforme a figura 2.

Por fim, após a análise dos gases, é possível utilizar a técnica de Simulação de Monte Carlo (SMC) para ajudar na tomada de decisão. Segundo CAMPANHOLA. (2023):

"O Método de Monte Carlo (MMC) é uma ferramenta muito relevante para a solução de problemas que envolvem um elevado grau de incertezas, necessitando de um tratamento probabilístico para levar a um resultado adequado."

Ao modelar a incerteza através de distribuições de probabilidade e repetidas execuções, é possível obter uma visão clara dos possíveis resultados e suas probabilidades, tornando o processo de tomada de decisão mais robusto e confiável.

A Simulação de Monte Carlo cria um modelo de resultados possíveis utilizando distribuições de probabilidade, como a distribuição uniforme ou normal, para variáveis com incerteza inerente. O processo envolve recalcular os resultados repetidamente, cada vez usando um conjunto diferente de números aleatórios dentro dos valores mínimo e máximo. Esse exercício é repetido milhares de vezes em um teste típico, gerando muitos resultados prováveis. Conforme MENDES, Vênus L. S.; SILVA, Armando M. L.; COSTA, João G. C. (2021), "O algoritmo cronológico gera um grande número de repetições ou simulações (Nsim) do período de análise, baseado nas distribuições de probabilidade dos tempos envolvidos [...]".

A SMC é criada a partir da geração de números aleatórios no Excel utilizando o desvio padrão pela seguinte fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (4)$$

Em que:

σ = Desvio médio padrão
 x = Valor da amostra
 \bar{x} = Valor médio da amostra
 n = Número de amostras

Contudo, conhecendo as técnicas do método de Monte Carlo, é possível estimar a tendência da proporção de aumento dos gases dissolvidos no óleo, conforme a figura 3.

III. RESULTADOS

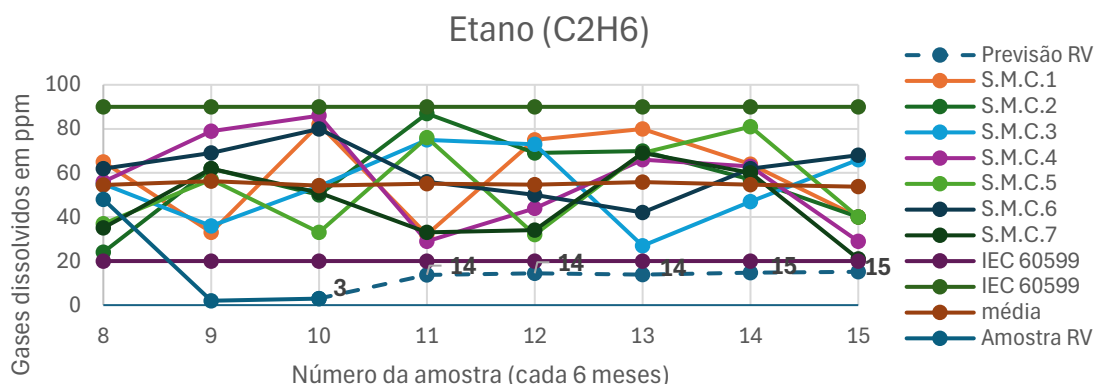
A partir da metodologia citada acima, iniciou-se a pesquisa de campo para coleta do óleo isolante de reguladores de tensão para análise cromatográfica. Foram coletadas diferentes amostras no período de 6 meses de intervalo para efetuar o diagnóstico dos gases dissolvidos no regulador, conforme ilustra a figura 4.

Após a extração, os líquidos foram enviados para o laboratório especializado em análise cromatográfica para a elaboração do teste. Com isso, obtém-se os dados em ppm da tabela 8.

Com os dados dos gases dissolvidos é possível analisar se há a presença de descargas parciais e a degradação do papel isolante utilizando o método de Rogers na tabela 9 e o método do Triângulo de Duval na figura 5.

Aplicando o método de Monte Carlo:

Figura 6 - Previsão do nível de Etano (C_2H_6) do regulador pelo método Monte Carlo



Fonte: Autores, 2024.

IV. CONCLUSÃO

Este artigo indica que os estudos de DE SOUZA (2023) mostraram ter correlação com os resultados laboratoriais. Ressalta-se a importância de interpretar esses resultados junto com outras informações, como o histórico operacional do transformador, normas vigentes e os métodos citados neste artigo, para uma avaliação mais precisa da vida útil do equipamento.

Por meio desta análise, foi possível perceber um sobreaquecimento T3 no regulador de tensão por meio da relação do Etileno (C_2H_4) e Etano (C_2H_6), que gerou um número maior que quatro na tabela 9. No entanto, a relação se normalizou nas próximas amostras. No entanto, é necessária uma nova coleta do óleo no intervalo de um mês para o acompanhamento das condições do equipamento, visto que os gases

Nitrogênio (N₂), Oxigênio (O₂) e Hidrogênio (H₂) estão com uma taxa de aumento de gás em ppm/ano elevada, maior que o estipulado por norma.

A ferramenta de simulação de Monte Carlo mostrou ser essencial na análise de dados e amostragem aleatória para resolver problemas de tomada de decisão com múltiplas incertezas. Com ela, foi possível modelar o comportamento do sistema, prever estados futuros dos gases dissolvidos no óleo isolante, gerando diversos cenários diferentes com a geração de números aleatórios e o cálculo do desvio padrão, oferecendo assim uma base sólida para a determinação da ação a ser tomada.

No entanto, para melhor exatidão e qualidade dos dados, é necessária uma variedade de dados de entrada. Por se tratar de um equipamento que não possui nenhum histórico de análise cromatográfica, as distribuições de probabilidades foram baseadas em três amostras do óleo, afetando assim a capacidade de prever com precisão eventos futuros e comprometendo o planejamento estratégico.

Por fim, evidencia-se a importância da análise cromatográfica do óleo isolante do regulador de tensão monofásico de distribuição e o uso da simulação de Monte Carlo para a análise e gestão de sistemas complexos com incertezas. Sua capacidade de fornecer uma compreensão profunda dos riscos, melhorar a precisão das previsões e apoiar decisões informadas faz dela um recurso valioso em diversas situações. A flexibilidade e a ampla aplicabilidade garantem que continue sendo uma técnica relevante e poderosa para diagnosticar os gases isolantes em reguladores e transformadores, promovendo uma operação segura e evitando danos às pessoas e aos equipamentos.

V. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10576: Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos - Diretrizes para supervisão e manutenção: elaboração.** 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7274: Amostragem de gases e óleo mineral isolante de equipamentos elétricos e análise dos gases livres e dissolvidos: elaboração.** 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2006

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7070: Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço: elaboração.** 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012

ANTUNES, Harison A; **Metodologia de Acompanhamento e Identificação de Falha em Transformadores (MAIFT): contribuição da identificação da causa raiz aliada à manutenção preditiva.** 2020. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2020.

CAMPANHOLA, Filipe Possatti. **Ferramenta de apoio à gestão de ativos para sistema de potência empregando os métodos ahp e monte carlo aplicada a transformadores de potência.** 2023. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2023.

COSTA, Leonardo. L.; MELO, Kayck. H. P.; **Regulador de tensão monofásico aplicação em redes de distribuição de energia elétrica.** 2019. Dissertação (Bacharel em Engenharia Elétrica) - faculdades FINOM e Tecsoma, Minas Gerais, 2019.

DE SOUZA, Marcino. A. L.; **Comparação entre os métodos dga online e laboratorial para avaliação do estado de óleos minerais em transformadores de potência.** 2023. Dissertação (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Pará, 2023.

MATHWORKS. **Duval Triangle.** Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/31317-duval-triangle>. Acesso em: 20 maio. 2024.

MENDES, Vênus L. S.; SILVA, Armando M. L.; COSTA, João G. C.; **Simulação Monte Carlo Cronológica para Dimensionamento de Transformadores Reservas em Subestações de Distribuição,** Rio de Janeiro, fev. 2021. Sociedade Brasileira de Automática (SBA). Disponível em: <https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2336>. Acesso em: 17 abr. 2024.

TOLEDO, Lucas S. **Diagnostico_Gases_Isolantes.** Disponível em: https://github.com/TCCII-Lucas/Diagnostico_Gases_Isolantes. Acesso em: julho de 2024.

VI. AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha gratidão a Deus por ter me acompanhado em cada etapa deste trabalho, dando-me coragem e paciência para enfrentar os desafios e perseverar em minha jornada acadêmica. Aos orientadores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso. Aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas e aprendizado, e por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo material incluído no artigo.

Atualizado em: 27/06/2024