



TRANSFORMADORES CONVERSORES: FUNCIONAMENTO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE COMUTADORES SOB CARGA (OLTC)

Prof. Dr Lucas Fernando Seelig Rangel Arantes – Faculdade Serra Dourada
Antônio Ricardo Sá – Faculdade Serra Dourada

A crescente demanda por energia e a integração de grandes usinas geradoras distantes dos centros de consumo consolidaram os sistemas de transmissão de corrente contínua em alta tensão (HVDC) como uma solução estratégica para o setor elétrico. No coração desses sistemas, os transformadores conversores desempenham a função vital de interligar as redes de corrente alternada (AC) e contínua (DC). Dentro desses transformadores, os comutadores sob carga (OLTC – *On-Load Tap Changers*) são componentes essenciais, responsáveis por ajustar a tensão em tempo real para garantir a estabilidade do fluxo de potência, sem a necessidade de interrupção do fornecimento. A elevada confiabilidade dos OLTCs é, portanto, determinante não apenas para o desempenho e segurança dos transformadores, mas para a estabilidade operacional de todo o sistema elétrico interligado. Qualquer falha nesses dispositivos pode levar a interrupções de grande escala e perdas financeiras significativas. Neste contexto, este artigo explora uma abordagem moderna para a manutenção de OLTCs em transformadores conversores, integrando técnicas de diagnóstico consolidadas, como a análise de gases dissolvidos (DGA), com ferramentas de visualização de dados para otimizar a gestão de ativos e assegurar a máxima disponibilidade do sistema.

I. Conceitos Fundamentais

A gestão eficaz da manutenção de OLTCs exige a compreensão de sua função no sistema HVDC e das principais ferramentas de diagnóstico utilizadas para monitorar sua condição operacional.



A. Transformadores Conversores HVDC

Os transformadores conversores são o elo entre a rede AC e os conversores de potência que realizam a retificação (AC para DC) ou a inversão (DC para AC). Eles são projetados para suportar não apenas as tensões nominais do sistema, mas também os complexos estresses harmônicos e de corrente contínua impostos pelo processo de conversão. O controle preciso da tensão no lado AC, realizado pelo OLTC, é fundamental para regular a potência ativa e reativa transferida pelo link HVDC.

B. Comutador Sob Carga (OLTC)

O OLTC é um dispositivo mecânico e elétrico complexo que permite a alteração da relação de espiras do transformador enquanto ele está energizado. Sua operação envolve a comutação entre diferentes "taps" (derivações) do enrolamento. O componente mais crítico do OLTC é o comutador de desvio (diverter switch), que transfere a corrente de carga de um tap para o outro. Durante essa fração de segundo, arcos elétricos são gerados, causando estresse térmico e elétrico nos contatos e a degradação do óleo isolante circundante. Esse processo é a principal fonte de geração de gases e desgaste do equipamento.

C. Análise de Gases Dissolvidos (DGA)

A Análise de Gases Dissolvidos (DGA) é a principal técnica de diagnóstico para equipamentos imersos em óleo isolante. A energia gerada por arcos elétricos ou pontos quentes decompõe as moléculas do óleo, gerando gases como hidrogênio (H_2), metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4) e acetileno (C_2H_2). A quantidade e a proporção desses gases fornecem informações valiosas sobre a natureza e a severidade de uma falha incipiente, permitindo a transição de uma manutenção corretiva ou preventiva para uma manutenção preditiva, baseada na condição real do ativo.



III. Metodologia

Este estudo foi conduzido por meio de uma abordagem multidisciplinar, combinando revisão teórica com análise de dados de campo para validar a eficácia da manutenção preditiva em OLTCs de transformadores conversores. A metodologia foi estruturada nas seguintes etapas:

A. Levantamento Bibliográfico e Normativo

Realizou-se uma pesquisa aprofundada em normas técnicas nacionais e internacionais (ABNT, IEC, IEEE) e na literatura científica (CIGRÉ), além de documentação técnica de fabricantes (ABB, Siemens, Hitachi Energy), para consolidar os critérios de operação, manutenção e diagnóstico de OLTCs em sistemas HVDC.

B. Coleta e Análise de Dados de Campo

O estudo prático concentrou-se na análise técnica de dados operacionais dos transformadores conversores das estações Xingu e Rio. Foram coletadas e analisadas amostras de óleo isolante dos compartimentos dos OLTCs para a realização de análises de gases dissolvidos (DGA) em laboratório, seguindo as melhores práticas e padrões normativos.

C. Implementação de Ferramenta Digital

Os resultados da DGA e outros parâmetros operacionais relevantes dos OLTCs foram centralizados e processados utilizando um dashboard desenvolvido na plataforma Power BI. Esta ferramenta foi projetada para monitorar, correlacionar e visualizar as tendências dos gases e outros indicadores de condição, fornecendo uma base de dados interativa para a tomada de decisão técnica.

IV. Resultados e Discussão

A aplicação da metodologia proposta permitiu a transição de um modelo de manutenção reativo para uma estratégia proativa, baseada na condição dos equipamentos, gerando resultados qualitativos e quantitativos significativos.



A. Eficácia da Manutenção Baseada na Condição

A adoção do monitoramento contínuo por meio da DGA permitiu antecipar falhas potenciais, otimizar o planejamento de intervenções e prolongar a vida útil dos comutadores. A análise das tendências de gases tornou-se a principal ferramenta para decidir o momento ideal para uma revisão interna, evitando paradas desnecessárias baseadas apenas em tempo de operação ou número de comutações.

B. Análise de Tendências via DGA

Os resultados das análises DGA mostraram um aumento gradual e consistente de gases combustíveis, especialmente hidrogênio (H₂), metano (CH₄) e etileno (C₂H₄), conforme ilustrado no Gráfico 1. O hidrogênio está associado a descargas parciais, enquanto os hidrocarbonetos indicam decomposição térmica do óleo. Essa tendência é esperada devido ao processo normal de comutação, mas sua taxa de crescimento é um indicador crucial da saúde do OLTC. A detecção de taxas de crescimento anormais permitiu a programação de manutenções antes que os níveis atingissem limites críticos.



Gráfico 1 – Evolução dos Gases Combustíveis Chave no OLTC

Fonte: Lab. ACS, 2025



C. Otimização da Tomada de Decisão com Ferramentas Digitais

O uso do dashboard em Power BI (Figura 1) foi um diferencial para a equipe de manutenção. A ferramenta facilitou a visualização clara das tendências de gases, a correlação com o número de manobras e outros eventos operacionais, e a comparação entre diferentes unidades. Isso transformou dados brutos de laboratório em informações estratégicas, auxiliando no planejamento de manutenção preditiva e na tomada de decisões técnicas rápidas e embasadas. Como resultado direto, observou-se um aumento na disponibilidade e confiabilidade dos transformadores, comprovando a eficácia da integração entre diagnóstico avançado e análise digital. A Figura 2 ilustra a complexidade interna de um comutador, reforçando a importância de técnicas de diagnóstico não invasivas para monitorar sua condição sem a necessidade de desmontagem.

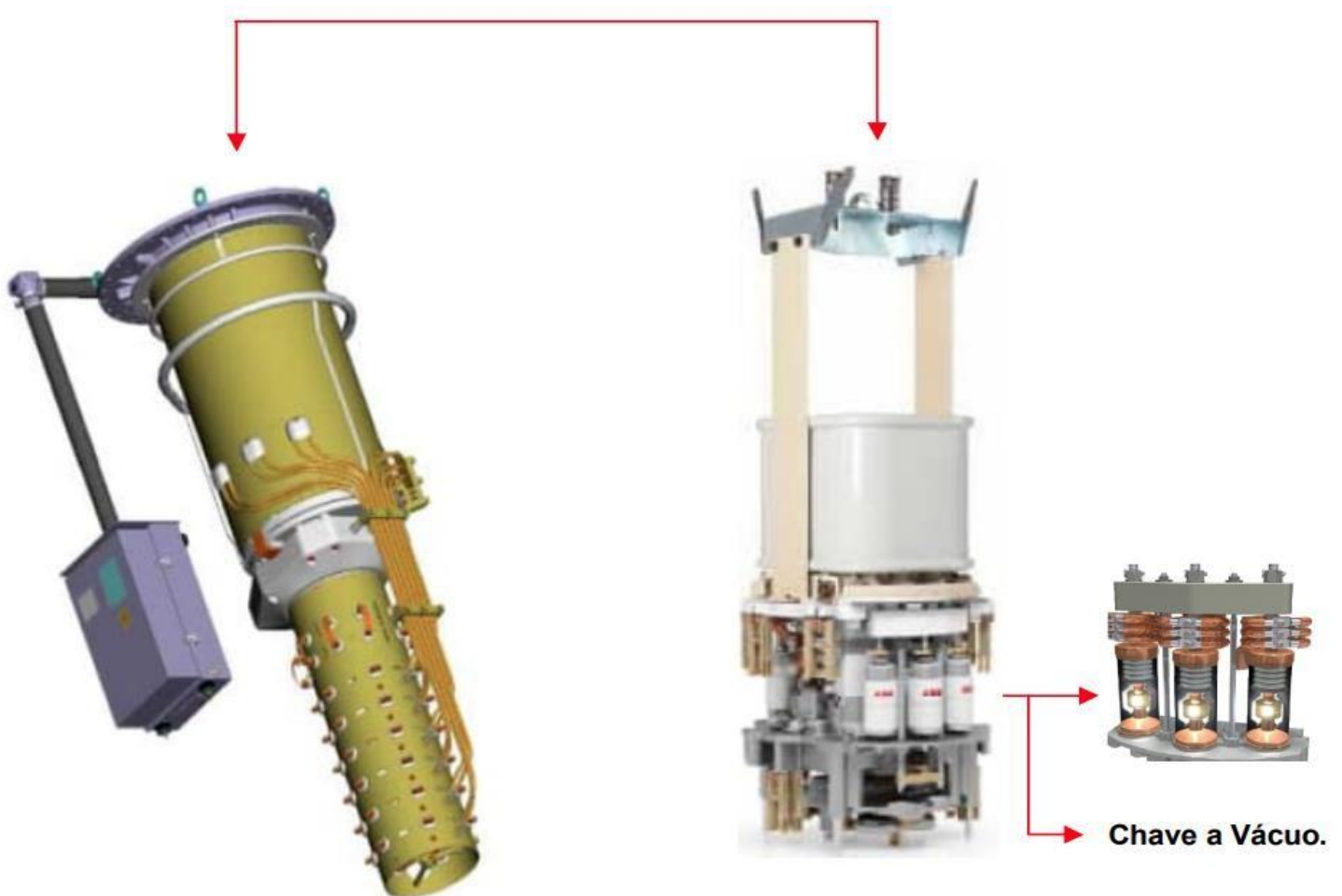


Figura 2 – Seção Transversal de um Comutador Sob Carga (OLTC) Típico

Fonte: HITACHI ENERGY (Suíça), 2019



V. Alinhamento do Estudo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

O presente trabalho está diretamente alinhado às metas globais de sustentabilidade da Agenda 2030 da ONU. A otimização da manutenção de componentes críticos de sistemas HVDC contribui significativamente para múltiplos objetivos:

- **ODS 7 (Energia Limpa e Acessível):** Ao garantir a máxima disponibilidade e confiabilidade da infraestrutura de transmissão, o estudo assegura que a energia gerada por grandes usinas renováveis (como hidrelétricas na Amazônia) seja entregue de forma eficiente e segura aos centros de consumo, fortalecendo a matriz energética limpa do país.
- **ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura):** A metodologia proposta representa uma inovação tecnológica na gestão da manutenção, aplicando digitalização e análise de dados para modernizar a operação de uma infraestrutura energética crítica. Isso promove um modelo de desenvolvimento mais resiliente, inteligente e sustentável.

VI. Considerações Finais

O estudo evidenciou que a integração de tecnologias digitais às estratégias de manutenção preditiva aprimora significativamente a gestão de ativos críticos como os comutadores sob carga. A capacidade de monitorar a condição dos equipamentos em tempo real, utilizando dados de DGA processados em dashboards interativos, possibilita decisões mais precisas e intervenções direcionadas, resultando em maior confiabilidade, redução de custos operacionais e aumento da segurança. Conclui-se que a digitalização e a análise de dados não são apenas tendências, mas pilares essenciais para o futuro da manutenção no setor elétrico. A adoção de tais práticas está perfeitamente alinhada às necessidades de eficiência, confiabilidade e sustentabilidade do setor energético brasileiro, garantindo que a infraestrutura estratégica do país opere com o máximo de seu potencial.



Referências

ABB. (2020). *Technical Documentation on On-Load Tap-Changers*.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). (2019). *Procedimentos de Rede*.

CIGRÉ. (2014). *Technical Brochure 589: On-Load Tap-Changer Diagnostics*.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). (2023). *Plano Decenal de Expansão de Energia*.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). (2014). *IEC 60599: Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis*.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). (2022). *IEEE C57.139: IEEE Guide for Dissolved Gas Analysis in Transformer Load Tap Changers*.

SIEMENS. (2022). *Transformer Lifecycle Management*.