

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

MONITORAMENTO DE DISJUNTORES DE AT POR MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO: CONCEITOS E CASOS PRÁTICOS.

**LUIZ HENRIQUE SILVA DUARTE(1);RANDERSON MORAIS DE FREITAS(2);JUSSARA
ATTADEMO(2);FOUAD BRIKCI (3)
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS(1);UTILI ENERGIA EQUIPAMENTOS E
SOLUCOES LTDA(2);ZENZOL AUTOMATION INC.(3)**

RESUMO

A busca de um monitoramento preditivo eficaz têm sido um grande desafio no setor elétrico brasileiro, seja na Transmissão, ou na Subtransmissão. Esse tema é particularmente importante e urgente para as denominadas manobras diárias ou de alta cadência, principalmente de reatores e capacitores de alta tensão. A falha ou defeito desses equipamentos têm implicado a indisponibilidade dessas funções de transmissão, dificuldades operacionais e penalidades para as concessionárias.

O artigo apresenta uma nova visão e prática para manutenção preditiva e manutenção de disjuntores, com resultados satisfatórios no que se refere a maior exatidão do diagnóstico, e principalmente, propiciando maior disponibilidade e menores custos para o sistema elétrico. Um novo patamar para a gestão desses ativos será alcançado, incluindo uma melhor compreensão e maior aprendizado sobre o comportamento e desempenho dos disjuntores de alta tensão.

PALAVRAS-CHAVE

Disjuntores de Alta Tensão, Regulação, Manutenção Preventiva, Gestão de Ativos.

1.0 INTRODUÇÃO

Os disjuntores desempenham função fundamental nos sistemas elétricos de potência, seja em manobras de regime permanente para compensação reativa, por exemplo, seja na eliminação de faltas. Uma falha operativa do disjuntor implica a degradação da configuração do sistema elétrico adjacente, a indisponibilidade de funções importantes (geração, compensação reativa, linhas de transmissão, etc.) e até desligamentos de grandes proporções. Ou seja, a confiabilidade operativa dos disjuntores é primordial para o atendimento aos consumidores.

Apesar da sua relevância e contribuição histórica, os ensaios, métodos e técnicas atualmente utilizadas nas manutenções e monitoramentos dos disjuntores de alta tensão: ensaios de tempo de operação, análise de percurso, resistência ôhmica de contatos, etc., não têm mostrado a assertividade necessária para identificar defeitos e evitar falhas em disjuntores. São ensaios relevantes, mas o contexto demanda novas estratégias e metodologias.

Portanto, até então, os ensaios convencionais e monitoramentos preditivos empregados, para disjuntores, não demonstraram uma eficácia satisfatória ao longo dos anos. As concessionárias relatam falhas inesperadas desses equipamentos com consequências indesejáveis a todas as partes interessadas.

Fica evidente a necessidade de se buscar e praticar ensaios com uma abordagem diferente das convencionais. Nesse contexto, a análise vibro-acústica tem se mostrado muito eficaz com relevantes resultados e benefícios.

Importante lembrar que, historicamente, vários estudos do CIGRÉ apontam que cerca de 30 a 40% das falhas maiores de disjuntores de AT são relacionadas aos mecanismos de acionamento, e outros 30% relacionados aos sistemas de interrupção, muitas vezes com origem mecânica [1]. Dessa forma, a metodologia de ensaios a ser apresentada e discutida está centrada na avaliação do comportamento e performance mecânica dos disjuntores, mas não se restringindo a tal aspecto.

A análise vibro-acústica permite a atuação preditiva da engenharia de manutenção para disjuntores de alta tensão (AT), evitando a intervenção nas fases “tardias” da clássica curva PI (Potencial de Falha, em português). Além, a

metodologia proposta pode ser aplicada ao longo de todo o ciclo de vida útil, desde a fabricação, ampliando a abordagem da técnica para a curva DIPF (Projeto, Instalação, Ponto inicial onde a falha pode ser detectada e Falha funcional), conforme Figura 1.

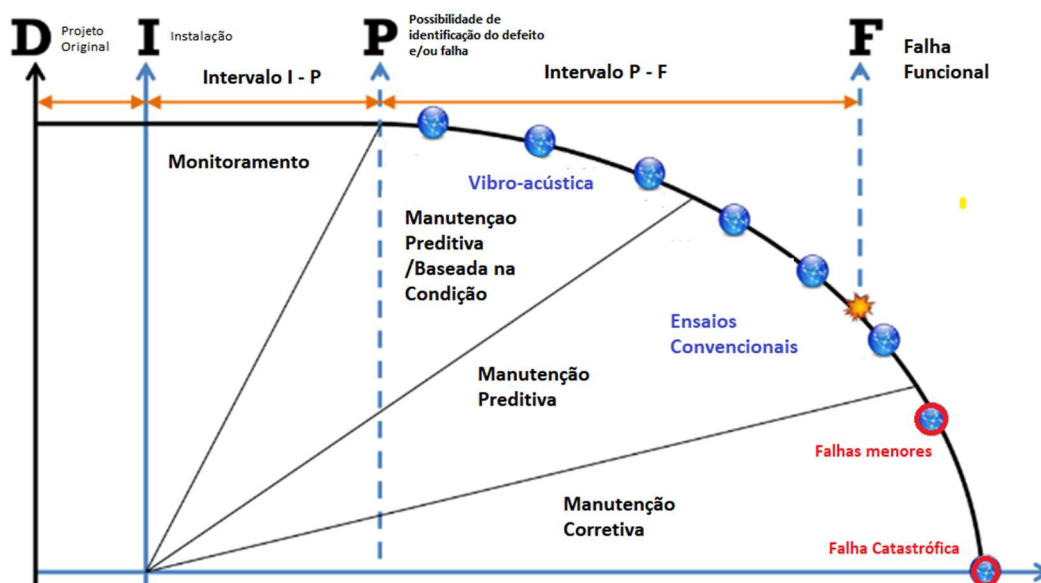


Figura 1 - Curva DIPF adaptada para disjuntores de AT

Esse método não intrusivo tem sido considerado como importante ferramenta para a redução de falhas e mitigador de riscos [2]. Percebe-se, portanto, que a metodologia proposta representa um importante avanço na gestão de ativos pertinente a disjuntores de alta tensão e equipamentos associados, com muitas oportunidades de melhorias de desempenho, custos e mitigação de riscos.

Antes da apresentação da metodologia e análise vibro-acústica, cabe uma breve discussão e alinhamento sobre o conceito de ensaios e preditivos e o pleno monitoramento das condições operativas do disjuntor e diagnósticos.

A construção de um monitoramento e diagnóstico (M&D) efetivo para qualquer ativo passa pela obtenção e/ou desenvolvimento de grandezas pertinentes, sensores, métodos de ensaios *on line* ou *offline*, tratamentos de dados e construção de uma inteligência de suporte, e inevitavelmente, a expertise dos profissionais envolvidos. Apesar de alguns produtos do mercado ofertarem uma solução pronta, o que se observa, em geral, é a frustração em relação às expectativas, pois um sistema pleno de M&D requer tempo e grande esforço dos profissionais envolvidos. Claro, essa afirmação considera a utilização de mineração de dados, inteligência artificial.

Nesse contexto, a abordagem desse artigo será com ênfase em ensaios e coleta de informações muito importantes para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento a médio e longo prazo. Os casos práticos mostraram a capacidade de diagnóstico de alguns defeitos de maneira imediata, mas se limitar a esses casos, seria restringir o grande avanço que se pode obter com a combinação da metodologia proposta com a expertise dos profissionais responsáveis pelas análises das informações obtidas. Esse alinhamento se faz muito importante mediante os conceitos conflitantes aplicados e ensaios preditivos, monitoramento, diagnósticos e gestão de ativos, com uma tendência, no Brasil, de superestimar os resultados esperados.

2.0 METODOLOGIA PROPOSTA

A estratégia está centrada na medição, tratamento e análise dos fenômenos transitórios de vibração dos disjuntores. A obtenção de curvas específicas para a condição normal de operação, ou seja, as assinaturas, e uma comparação dessas com curvas em condições de defeitos (substancialmente, antes das falhas), indicará a necessidade de revisões, manutenções etc.

Essa metodologia é suportada e consiste no sistema de aquisição de dados, em sensor apropriado, no caso, o acelerômetro, no algoritmo para tratar as medições, na configuração de ensaio e na expertise dos profissionais.

O sistema de aquisição de dados de alto desempenho adota uma frequência de amostragem de 100 a 200 kHz, ou seja, uma taxa de amostragem de 5 e 10 microssegundos. Essa taxa de amostragem tem se mostrado fundamental

para a adequada análise de vibração. A Figura 2 demonstram a importância da frequência de amostragem, utilizando, como exemplo ilustrativo, uma esfera quicando num prato, onde se nota claramente perdas e distorções importantes do sinal amostrado.

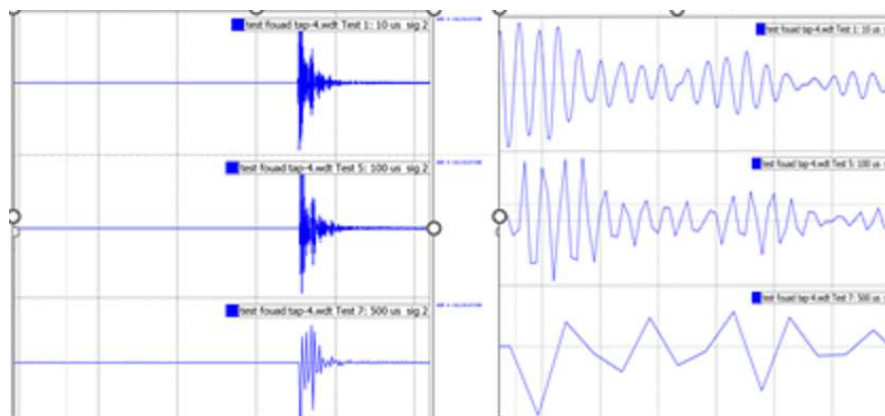


Figura 2 - Sinais de vibração adquiridos (amplitude x tempo) de uma esfera quicando num prato, com tempo de amostragem iguais a 10, 100 e 500 microsegundos (de cima para baixo) à esquerda, e as mesmas formas de ondas com a escala de tempo ampliadas.

Estrategicamente, as medições de vibração em disjuntores podem ocorrer simultaneamente e sincronizadas com as obtenções dos tempos de operação e das curvas de percurso do disjuntor, sendo disparadas a partir dos pulsos das bobinas de fechamento ou abertura.

Em relação aos sensores, os acelerômetros piezoelétricos utilizados possuem respostas exatas para uma ampla faixa de frequência, com boa linearidade, e faixa de medição entre 500g e 1.000g, compatíveis com as medições esperadas nos disjuntores. Possuem pré-amplificadores integrais, que fornecem sinais de saída na forma de modulação adequados para o sistema de aquisição de dados. Esses acelerômetros podem ser fixados nos disjuntores por meio de bases permanentes, instaladas utilizando-se colas especiais, resistentes a intempéries. Isso torna a instalação e realização dos ensaios muito simplificada e ágil.

Os algoritmos empregados do tipo DTW já são utilizados para reconhecimento de voz, tratamento de imagens, verificação de assinaturas, interpretação de curvas e técnicas de diagnósticos para processos industriais. Entretanto, um algoritmo DTW (Dynamic Time Warping) aperfeiçoado e modificado para as análises mecânicas é utilizado para o tratamento dos dados brutos adquiridos e para entrega de curvas que permitam análises e diagnósticos para a vibração dos disjuntores. Essa versão aperfeiçoada, em síntese, inclui a sincronização dos sinais, a supressão de ruídos usando filtros no domínio do tempo-frequência, o cálculo da média dos sinais de operações consecutivas dos disjuntores, penalidades para desvios de tempo aplicados ao algoritmo DTW, e avaliação da amplitude e desvio de tempo dos eventos mecânicos; sendo que esses últimos consistem em conceitos inovadores para o algoritmo DTW. Uma análise precisa dos desvios de tempo e amplitudes são fundamentais para os diagnósticos sobre as condições dos disjuntores.

O arranjo para os ensaios é muito simples, pois, para uma análise inicial, propõe-se a instalação de apenas um acelerômetro por polo de disjuntor. Essa instalação deve ser preferencialmente por meio de uma base pré-fixada para o acelerômetro, por meio de cola apropriada para intempéries, em local a ser definido para cada modelo de disjuntor. Além da minimização do tempo de instalação, essa preparação garante a devida repetibilidade de procedimentos e condições de medição, e por fim, efetividade dos ensaios. Na verdade, se se considerar a necessidade de realização dos ensaios convencionais de tempos de operação, curva de percurso, resistência dinâmica de contatos, por exemplo, não há acréscimo de tempo significativo para o ensaio de vibração. E ainda, como antecipado, esses ensaios podem ser realizados de maneira simultânea e sincronizada. Essa estratégia permitirá grandes ganhos na construção de diagnósticos, e será um grande condutor para o aprimoramento da expertise dos profissionais envolvidos.

A propósito, se faz muito importante retomar nesse artigo a breve discussão sobre o alinhamento de expectativas e conceitos envolvidos. Pela grande variedade de modelos de disjuntores; pelo aumento da complexidade e funcionalidades mecânicas dos projetos mais modernos, particularmente, nas câmeras de interrupção; e, principalmente, pelo imenso número e variações de defeitos possíveis, não há uma base de dados disponível para uma caracterização exata de falhas. Mas, o cenário é bastante otimista.

Primeiro, porque a percepção de operação indevida, numa fase muito precoce e as vezes, até imediata, é muito provável, por exemplo, no caso de falha de sincronização entre polos ou tempos indevido de operação, que pode ser identificada em ensaios *on line*. Esse fato já é um ganho considerável, principalmente para disjuntores que operam em alta cadência.

Ainda, a metodologia proposta traz consigo um novo universo de informações, não exploradas pelos especialistas. Os ensaios de vibração revelam características comportamentais não medidas pelos ensaios convencionais, permitindo compreender as operações do disjuntor além dos clássicos instantes notáveis, tais como, disparos das bobinas, separação de contatos, etc., e com detalhamento mecânico muitíssimo além, quantitativa e qualitativamente, das informações obtidas por meio do ensaio de análise de percurso. Importante lembrar que esse último ensaio é intrusivo, possui razoável complexidade na execução, e não pode ser realizado de maneira *on line*, o que não ocorre com o ensaio de vibração.

Portanto, a metodologia proposta tem como legado um importante avanço no aprendizado sobre disjuntores, e certamente, outras funções e diagnósticos serão possíveis, mesmo que não perfeitamente percebidos e/ou vislumbrados neste momento.

A Figura 3 mostra curvas obtidas para vibrações de disjuntores de mecanismo a mola, nas operações de fechamento e abertura.

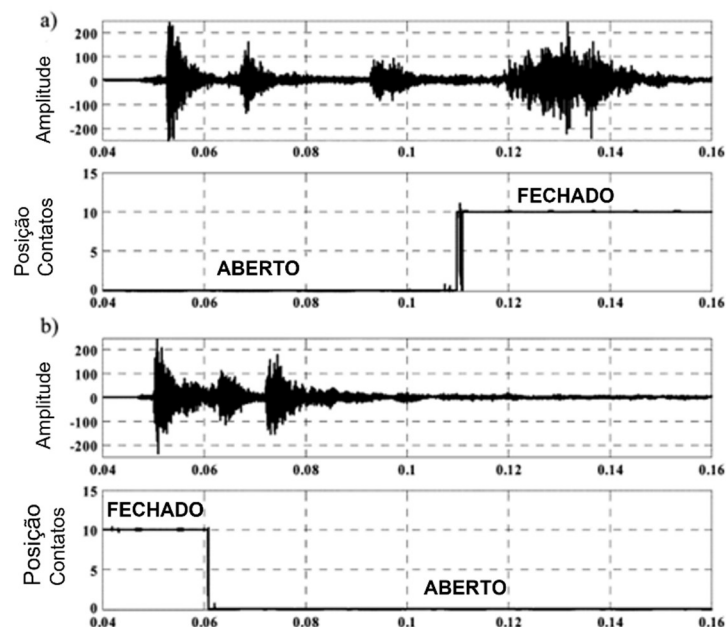


Figura 3 - a) Formas de onda de vibrações para operação de fechamento e de posição de contatos, versus tempo; b) Formas de onda de vibrações para operação de abertura e de posição de contatos, versus tempo.

Essas formas de onda são muito sensíveis à variação do comportamento mecânico dos disjuntores, e portanto, por meio da comparação, a metodologia proposta possui eficácia em diagnósticos precoces de defeitos mecânicos em disjuntores, seja nos mecanismos de operação ou em partes móveis da câmara de interrupção, inclusive indicando correlações com defeitos apurados posteriormente.

Essa técnica é capaz de detectar sistemas mecânicos com desgastes, quebras, afrouxamentos, desajustes, etc., decorrentes de montagens indevidas em fábrica ou campo, de falhas em grandes manutenções ou da longevidade operativa. Esses ensaios vibro-acústicos já demonstraram também eficácia na detecção de vazamento de gás SF₆.

3.0 CASOS PRÁTICOS

Os casos práticos a serem apresentados incluem a detecção e diagnósticos para disjuntor SF₆, com mecanismos a mola, apurados e/confirmados a partir da medição e análise vibro-acústica.

Caso 1: Exemplo de falta de sincronismo

Este caso mostra uma falha de sincronização entre polos de um disjuntor de alta tensão, evidenciada pela discrepância entre o tempo de início do movimento do polo da curva de vibração mais acima, e as curvas abaixo que

representam os demais polos, de 2,7 ms. Importante ressaltar que as curvas mostram todo o movimento mecânico dos disjuntores sincronizados com o pulso na bobina e com a medição de resistência dinâmica dos contatos principais, bem como lembrar que esse ensaio pode ser realizado com o disjuntor energizado, em serviço.

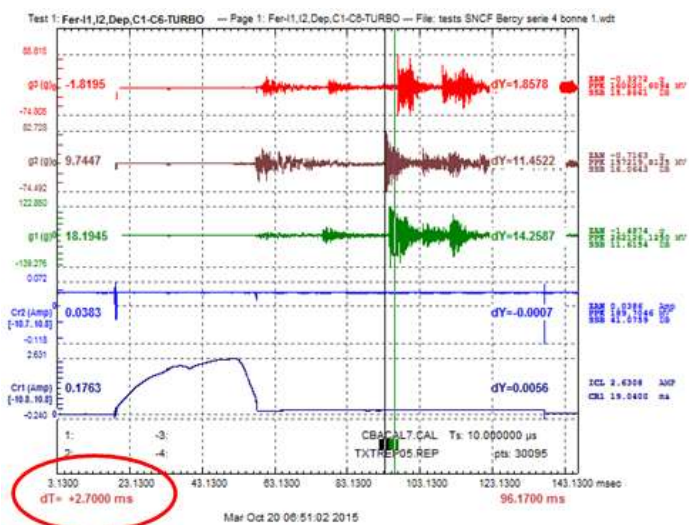


Figura 4 – Caso prático 1 - Falha de sincronismo entre polos de um disjuntor

Caso 2: Disjuntor com ajustes mecânicos indevidos

Este caso se refere a dois disjuntores, equipados com duas câmeras de interrupção, com ajustes indevidos no sistema de carregamento da mola de abertura em um polo, cada um, com consequências graves para o mecanismo de transmissão de movimento no cárter do disjuntor. Esse defeito é decorrente de uma processos de manutenção e provocou choques mecânicos entre a biela de acionamento e a parede do cárter, levando a um dos polos à falha, seguida de explosão. Esse caso demonstra aplicabilidade e ganhos da metodologia quando empregada para o controle de qualidade de serviços de montagem ou manutenção, em campo ou em oficinas.

Esse estresse mecânico majorado pôde ser identificado pelo alto valor de magnitude da forma de onda da vibração, conforme a Figura 5. A Figura 6 mostra os componentes envolvidos.

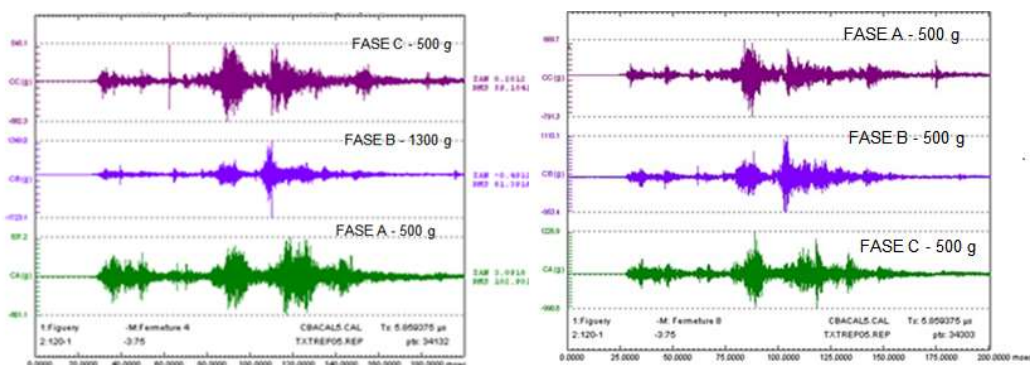


Figura 5 – a) Formas de onda da vibração dos três polos do disjuntor, com ajustes indevidos, com destaque para a Fase B; b) formas de onda após os ajustes devidos.



Na Figura 6 : No sentido horário, iniciando da imagem superior esquerda, a) o cárter responsável pela transmissão do movimento da haste de acionamento para as duas câmaras de extinção adjacentes; b) a mola de abertura e respectivo dispositivo de ajuste da compressão, onde ocorreu o ajuste indevido; c) marcas nas bielas de acionamento internas ao cárter; e d) danos nas paredes internas do cárter.

Caso 3: Disjuntor com torção no eixo de comando

Este caso prático demonstra a detecção pela metodologia proposta de uma anomalia mecânica grave no eixo de transmissão, que dificilmente seria detectada por meio dos ensaios convencionais, antes de uma falha maior.

A Figura 7 mostra duas formas de onda de vibração, uma normal, considerada como referência, e outra, medida no polo de disjuntor com a supracitada anomalia.

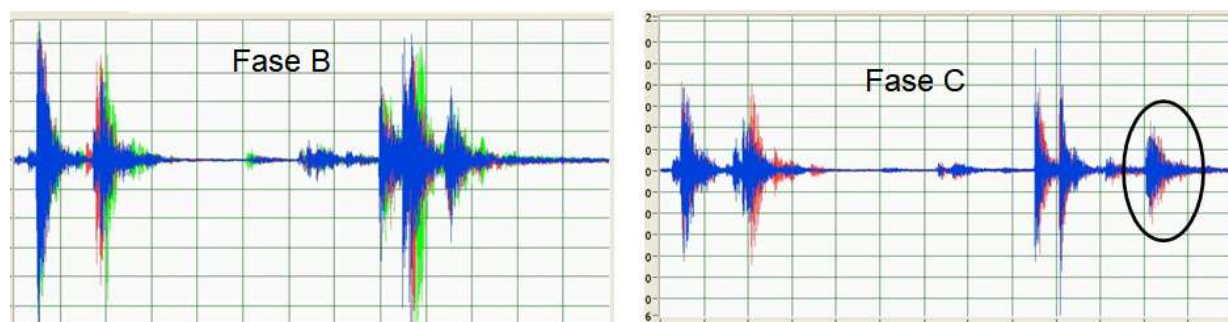


Figura 7 – Formas de onda de referência (à direita) e obtida na medição do polo com anomalia no eixo de comando.

A anomalia foi investigada e evidenciada pela equipe de manutenção, após as medições vibro-acústicas. A Figura 8 mostra o eixo de transmissão distorcido, peça primordial para o mecanismo de comando.



Figura 8 – Caso prático 3 – Eixo de comando do disjuntor distorcido

4.0 CONCLUSÕES

Os ensaios de medições vibro-acústicos não são intrusivos, de fácil e rápida execução, e ainda, podem ser realizados concomitantemente com os ensaios convencionais. Possui polivalência na identificação de defeitos mecânicos e elétricos em disjuntores, conforme demonstrado nos casos práticos.

Adicionalmente, a metodologia proposta possibilita atuar de maneira preditiva, pois, identifica a presença de defeitos em uma fase inicial, evitando-se falhas dos disjuntores. A possibilidade de desenvolver ensaios *on line* agrega confiabilidade aos ensaios e maximiza a disponibilidade dos disjuntores e funções do sistema elétrico associadas.

Portanto, a metodologia proposta inaugura um novo patamar nas práticas de manutenção e gestão de ativos pertinentes aos disjuntores. Também, representa uma nova leitura e ferramenta de compreensão do comportamento e desempenho dos disjuntores, com benefícios e aprendizado além daquele que se pode vislumbrar nesse momento. Trata-se de uma grande oportunidade para desenvolver e aperfeiçoar os especialistas no referido equipamento.

Essa inovação ocorre em excelente momento, tendo em vista a presença dos disjuntores modernos no sistema elétrico brasileiro, com considerável maior complexidade dos mecanismos, incluindo os sistemas de interrupção, que adotam tecnologias de sopro térmico, contatos principais e de arco com duplo movimento, dentre outros.

A aplicação de inteligência artificial é muito provável a médio prazo, e precisará contar, com o supracitado incremento da expertise dos técnicos envolvidos, a partir da inevitável disseminação da técnica de medição vibro-acústica em disjuntores. Paradoxalmente, a técnica já está bem desenvolvida para a aplicação, talvez, antes da percepção de notoriedade do setor elétrico. Mas, em tempo de se desenvolver e usufruir dos benefícios.

Obviamente, o foco em maximizar a confiabilidade e disponibilidade dos disjuntores se estende aos equipamentos associados: compensação reativa, linhas de distribuição/transmissão e compensação reativa. E por fim, possibilita melhor atendimento à sociedade nos serviços de energia elétrica, o que está alinhada com a regulação do setor, que, por sua vez, está desafiada a compreender as novas tecnologias, evitando-se restrições à aplicações, permitindo naturais substituições de procedimentos e práticas convencionais.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Balzer, D. Drescher, F. Heil, P. Kirchesch, R. Meister, C. Neumann; Evaluation of failure data of HV circuit-breakers for condition based maintenance; CIGRÉ A3 – 305, 2004.
- [2] CIGRÉ, JWG A3.32; Nom-intrusive methods for condition assessment of distribution and transmission switchgear; August, 2018.
- [3] Michel Landry, François Léonard, Champlain Landry, Réal Beauchemin, Olivier Turcotte, and Fouad Brikci; An Improved Vibration Analysis Algorithm as a Diagnostic Tool for Detecting Mechanical Anomalies on Power Circuit Breakers; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, N° 4, October, 2008.
- [4] Hans Kristian Høidalen and Magne Runde; Continuous Monitoring of Circuit Breakers Using Vibration Analysis; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, N° 4, October, 2005.
- [5] M. Runde, G. E. Ottesen, B. Skyberg, M. Ohlen; Vibration Analysis for Diagnostic Testing of Circuit-Breakers; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, N° 4, October, 1996.

6.0 DADOS BIOGRÁFICOS

(1) Luiz Henrique Silva Duarte é graduado e mestre em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas). Atuou como engenheiro, gestor de projetos e gerente nas áreas de planejamento e engenharia de manutenção, bem como na expansão para os segmentos de Geração e Transmissão, na Cemig GT por mais de 35 anos. Possui expertise técnica, principalmente, em engenharia, regulação e gestão de ativos de Transmissão. Atualmente é um consultor independente e professor do curso de Engenharia Elétrica da PUC Minas.

(2) Randerson atua no setor elétrico desde 2011 com formação específica na área. Atua diretamente com equipamentos para manutenção e ensaios de subestações. Especializou-se em diversos equipamentos de fabricantes com sede na Polônia, USA, Espanha, Alemanha e Canadá. Atualmente exerce o cargo de gerente comercial na UTILI ENERGIA. Está sempre em busca de novas tecnologias e melhorias para o setor elétrico. Membro coletivo do CIGRE Brasil e participante das feiras IEEE PES T&D.

(3) Jussara Attademo é engenheira eletricista com mais de 20 anos de experiência no setor elétrico. Sócia da empresa UTILI ENERGIA desde 2009 atuando diretamente em soluções para melhores práticas de manutenção e monitoramento para ativos da geração, transmissão e distribuição. É uma profissional versátil e comprometida em oferecer o melhor resultado para seus clientes.

(4) Fouad Brikci nasceu em Marrakech, Marrocos, em 1951. É mestre em eletrônica, eletrotécnica e automação e Doutor em Eletrônica pela Universidade de Bordeaux, França, em 1975 e 1977, respectivamente. Atualmente, é presidente da Zensol Automation Inc., St-Laurent, QC, Canada. Ele é pioneiro na introdução do conceito de equipamentos computadorizados para ensaios de campo em disjuntores AT. Foi professor universitário na Ecole Polytechnique Algiers e pesquisador na CNRS-LAAS, França. Possui expertise em eletrônica, automação e ciência da computação. Suas atividades têm sido focadas na aplicação industrial de computadores. Dentre as suas realizações, inclui-se o desenvolvimento de sistemas de medições plenamente computadorizadas para o controle de qualidade na fabricação de disjuntores AT, laboratórios e serviços de manutenção de concessionárias de energia elétrica. É especializado de ensaios de disjuntores AT desde 1990.