

Análise de Faltas Passantes em Transformadores de Potência como ferramenta de manutenção preditiva

Tema: Gestão Ativos e Manutenção

Autores: André Silva Rosário

Co-Autores: Allyson Figueredo, Carlos Daniel

Empresa: Energisa Sergipe - Distribuidora de Energisa SA

Resumo

Segundo a ABNT NBR 5356-5:2015, a capacidade térmica de um transformador de potência é calculada considerando a exposição (estresse térmico) de $25 \times I_n$ por um tempo máximo de 2 segundos, desta forma, o equipamento deve ser fabricado para suportar o referido estresse térmico sem apresentar falhas. A IEEE Std C57.109™-2018, indica que para correntes de falta próximas a capacidade do projeto, os efeitos mecânicos são mais significantes que os efeitos térmicos, em função das forças eletromecânicas axiais e radiais que atuam nos enrolamentos do transformador, mesmo considerando tempos abaixo de 2 segundos de exposição ao curto-circuito. Os sistemas de proteção são parametrizados para atuar em tempos muito menores, de aproximadamente 100 milissegundos a depender do sistema de proteção (considerando Disjuntor, Transformador de Corrente e Relé), porém, não conseguem impedir a atuação das forças mecânicas. Partindo desse contexto, a Energisa Sergipe identificou a oportunidade de aplicar a análise das Faltas Passantes em Transformadores de Potência como ferramenta de Manutenção Preditiva. Neste artigo será apresentada a experiência da empresa com a aquisição, modelagem e análise dos dados, além de apresentar um caso em que foi aplicada a análise das faltas passantes como ferramenta de apoio na identificação de defeitos mecânicos.

1. Introdução

1.1 - Transformadores de Potência – Aspectos Gerais

Os transformadores de potência são equipamentos aplicados em sistemas elétricos de corrente alternada, com objetivo principal de integrar sistemas de diferentes níveis de tensão. Os referidos sistemas podem ser concebidos com o nível de tensão mais conveniente tanto do ponto de vista técnico como do econômico (D'AJUZ, 1985, p 53). Esses equipamentos são de alta complexidade, possuem diversos componentes (figura 01) e elevado custo, portanto, devido a sua importância, tornam-se ativos protagonistas, nos aspectos de projetos elétricos e eletromecânicos, estudos de proteção elétrica e principalmente na engenharia de manutenção.

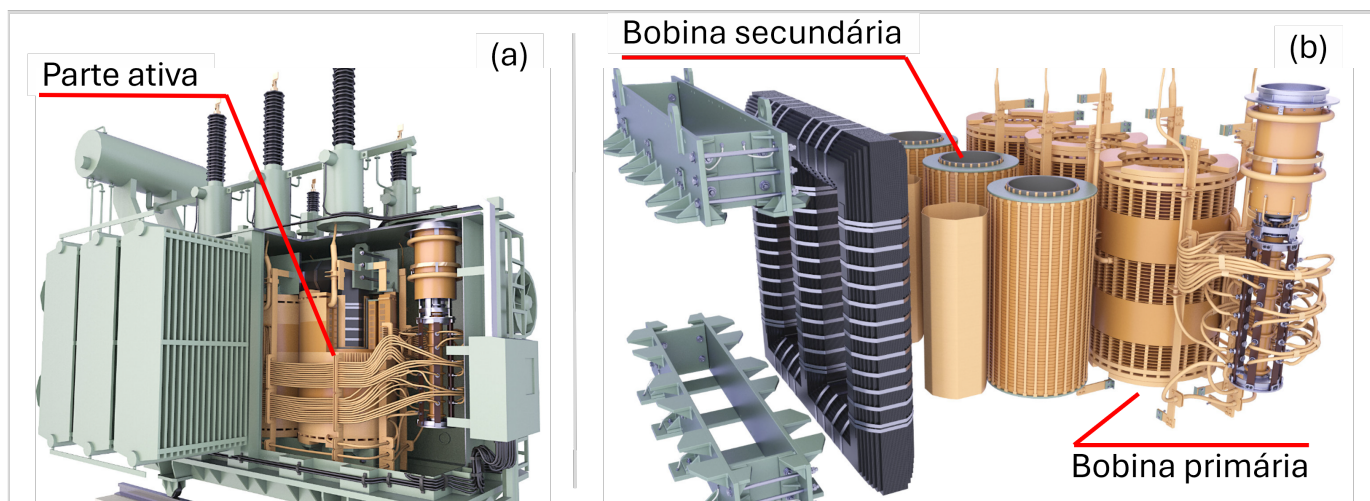


Figura 01 – (a) Parte ativa; (b) Bobina secundária

O Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico – MCPSE, define que no cenário Brasileiro, Transformador de Potência possui vida útil remunerável de trinta e cinco anos a partir da sua data de imobilização, tomando como base o envelhecimento da isolação sólida, normalmente realizada com papel isolante. Estes equipamentos podem ser submetidos aos parâmetros de projeto sem apresentar defeito ou falha, no entanto, quando são expostos a condições severas de estresse térmico, elétrico e mecânico que ultrapassam os limites predeterminados pelos projetistas, inicia-se o processo de degradação dos materiais existentes no transformador. A curva da banheira (figura 02), apresentada em (SELLITTO, 2005), representa as fases da vida de um sistema ou equipamento em função da taxa de falha, onde as maiores probabilidades de falha estão no início e no fim de sua vida útil.

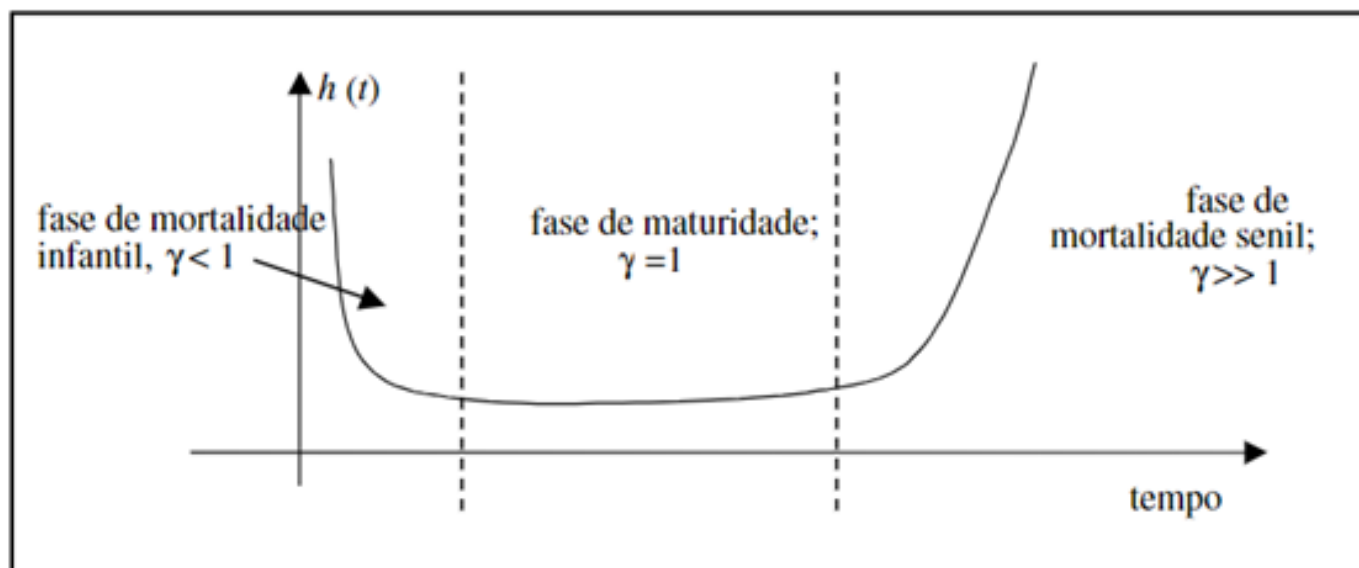


Figura 02 - Curva da banheira

Todos os equipamentos elétricos instalados em uma subestação de energia elétrica, inclusive os transformadores de potência, estão sujeitos as correntes de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero. As correntes de sequência negativa e zero surgem quando há um desequilíbrio em um sistema polifásico, que pode ser causado por uma falta de fase ou um curto-circuito fase-fase ou fase-terra (MAEZONO, 2009). Todos os transformadores da Energisa Sergipe possuem sistemas de proteção, que visam eliminar

os curtos-circuitos no menor tempo possível, não permitindo a ocorrência de danos térmicos, mecânicos e/ou elétricos.

Quando ocorre sobrecargas muito severas em um transformador de potência que está suprindo uma determinada carga, ele está sendo submetido a forças eletromagnéticas que estressam condutores, estruturas de suporte e estruturas de isolamento elétrica. As faltas passantes são um exemplo de sobrecarga severa e acontecem em função de eventos de curtos-circuitos externos, onde o transformador de potência é submetido a forças internas de grande intensidade, que podem ultrapassar a fronteira entre o limite elástico e plástico, acarretando defeitos aos enrolamentos, conforme figura 03.

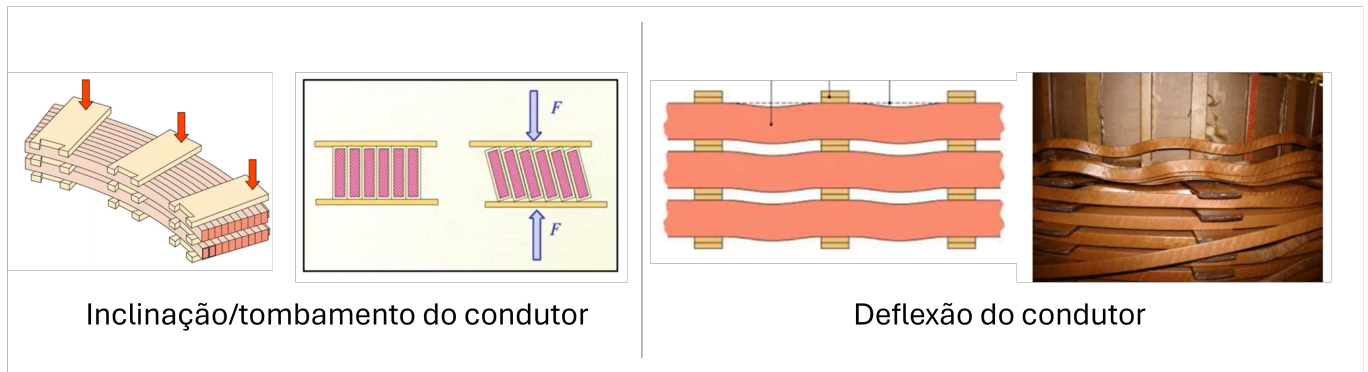


Figura 03 - Danos mecânicos aos condutores dos enrolamentos do transformador

O gerenciamento da manutenção considera parâmetros elétricos, mecânicos, físico-químicos e visuais, dos transformadores, tendo como objetivo principal evitar a interrupção do fornecimento de energia para os clientes, atuando de forma proativa, antevendo aos fatos. A intervenção poderá ser manutenção preventiva, substituindo componentes com base no tempo, no número de operações ou por necessidade apontada após inspeção, ser manutenção preditiva, que visa dizer antes que a falha ocorra, ou seja, fornecer parâmetros para a equipe de manutenção acompanhar a evolução da degradação de algum componente/sistema, sem a necessidade de interrupção do funcionamento do equipamento, permitindo o planejamento da intervenção para correção da falha incipiente e por fim manutenção corretiva, que atuará após a ocorrência de falha, para substituir a peça danificada ou todo o equipamento.

Segundo pesquisa realizada por (VAHIDI, 2014)., em novembro de 2014, ilustrada na figura 04 (a), 31,3% (maior percentual) dos transformadores estudados no continente europeu, falharam devido a problemas dielétricos e segundo pesquisa realizada por (TENBOHLEN S, 2023) em novembro de 2023, ilustrada na figura 04 (b), 30,27% (segundo maior percentual) dos transformadores estudados, falharam devido a problemas dielétricos, considerando equipamentos estudados em 27 países. Os estudos corroboram para a confirmação da necessidade de acompanhar a integridade da isolamento líquida e solida dos transformadores de potência, visando evitar falhas catastróficas. Os demais modos de falha somados representam grande parcela e devem ser estudados e acompanhados de perto por meio de técnicas preditivas e se possível, ferramentas computacionais quer forneçam informações para o devido gerenciamento da manutenção de transformadores de potência.

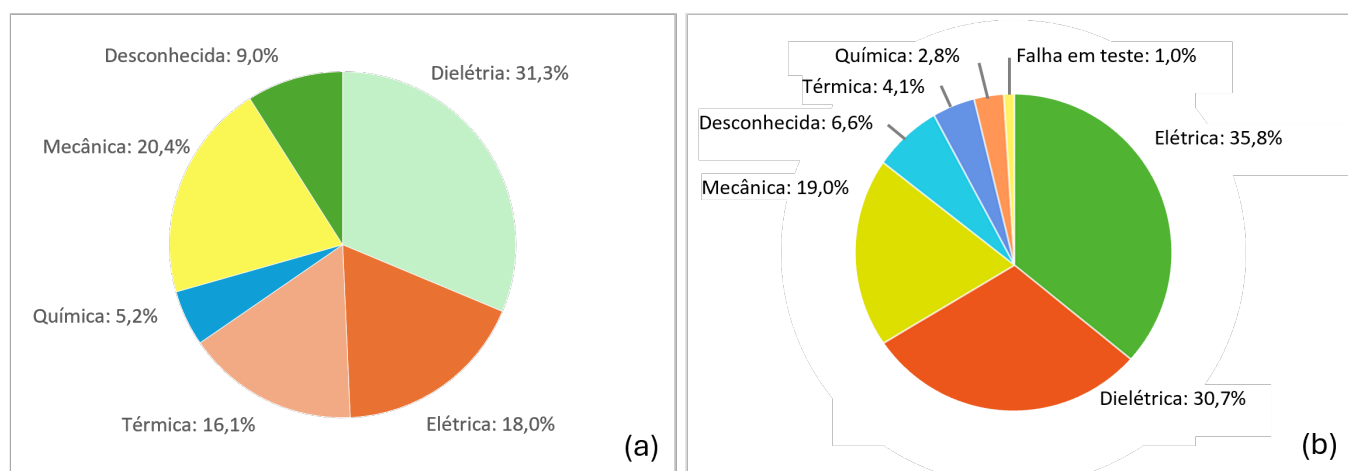


Figura 04 – (a) Falhas Transformadores Europeus; (b) Falhas Transformadores EUA

1.2 - Transformadores de Potência – Faltas Passantes

A falta passante, consiste em curto-circuito que ocorre externamente ao transformador e é necessariamente suprido por ele (figura 05) e faz parte do grupo de causas que podem acontecer em qualquer fase da vida útil, porém, é mais provável que cause falhas na região de maturidade ou mortalidade senil (conforme figura 02 da curva da banheira) do equipamento, onde as taxas de falha são constantes e exponenciais, respectivamente, juntamente com outras causas aleatórias externas ao sistema como: sobrecargas, surtos elétricos externos, impactos mecânicos, bruscas variações de temperatura, erros humanos de operação entre outros. (SELLITTO, 2005) aponta que, neste período, a melhor estratégia de manutenção é a preditiva, ou seja, utilizar técnicas que possam dar subsídios para o time de manutenção prever a falha.

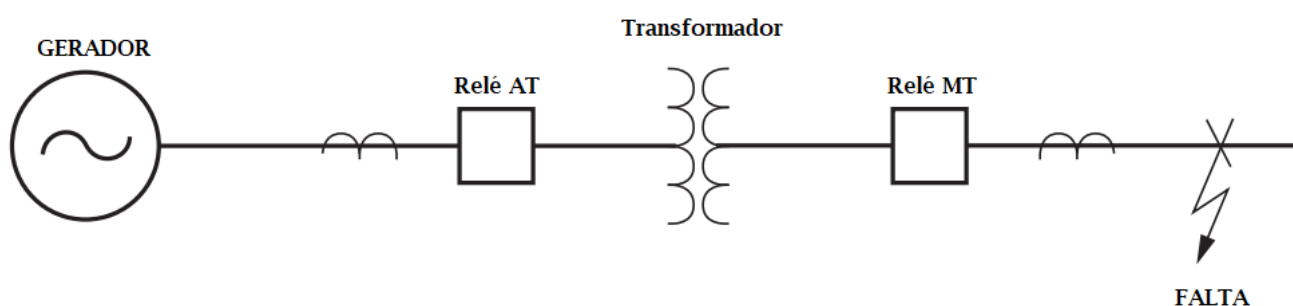


Figura 05 – Representação da falta passante em transformador de potência

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da norma 5356-5 (Capacidade de resistir a curtos-circuitos), parte 5, item 4.1.3, especifica o tempo máximo de 2 segundos de exposição a corrente de curto-circuito de no máximo 25 vezes a corrente nominal, levando em consideração o estresse térmico, porém, não considera o estresse mecânico ao qual o enrolamento do transformador é submetido. Estes parâmetros são seguidos pelos principais fabricantes de transformadores de potência do Brasil e caso seja necessário especificar um transformador para condições superiores deve ser acordado entre fornecedor e cliente. O Guia norteamericano IEEE C54-109 denominado “Guia para Duração da Corrente de Falta Passantes em Transformadores Imersos em Óleo Isolante”, orienta a aplicação de dispositivos de proteção de sobrecorrente, visando indicar os níveis de corrente elétrica e tempos limites aos quais os transformadores

de potência podem ser submetidos a curto-circuitos passantes, sem causar danos térmicos (tabela 01) e mecânicos.

Tabela 01 – Capacidade de carga térmica para transformador em função do tempo

Tempo	Veze a corrente
2 s	25.0
10 s	11.3
30 s	6.3
60 s	4.75
5 min	3.0
30 min	2.0

No referido guia norte-americano, os transformadores de potência são categorizados em I, II, III e IV, com base na IEEE Std C57.12.00, conforme tabela 02. Neste artigo abordaremos os tipos III e IV que correspondem aos equipamentos instalados na Energisa Sergipe com potências trifásicas entre 5.001KVA e 30.000KVA (tipo III) e acima de 30.000KA (tipo IV).

Tabela 02 – Categorias de transformadores

Categoria	Monofásico (KVA)	Trifásico (KVA)
I	5 a 500	15 a 500
II	501 a 1667	501 a 5.000
III	1668 a 10.000	5001 a 30.000
IV	Acima de 10.000	Acima de 30.000

O estresse mecânico foi incluído no guia de forma a preencher uma lacuna no que diz respeito a preservação do transformador de potência. A figura 6 apresenta as curvas de danos térmico e mecânico e deve ser aplicada como curva de proteção para faltas que ocorrerem com frequência (tipicamente mais que 5 vezes ao longo da vida do transformador). Parte da curva é dependente da impedância de curto-circuito para correntes de falta acima de 50% da máxima corrente possível e é alterada para I^2t do pior caso de força mecânica, quando o equipamento é submetido a máxima corrente de falta por 2 segundos. As curvas tracejadas representam as impedâncias selecionadas. A porção restante corresponde as curvas de proteção térmica para faltas abaixo de 50% do nível máximo.

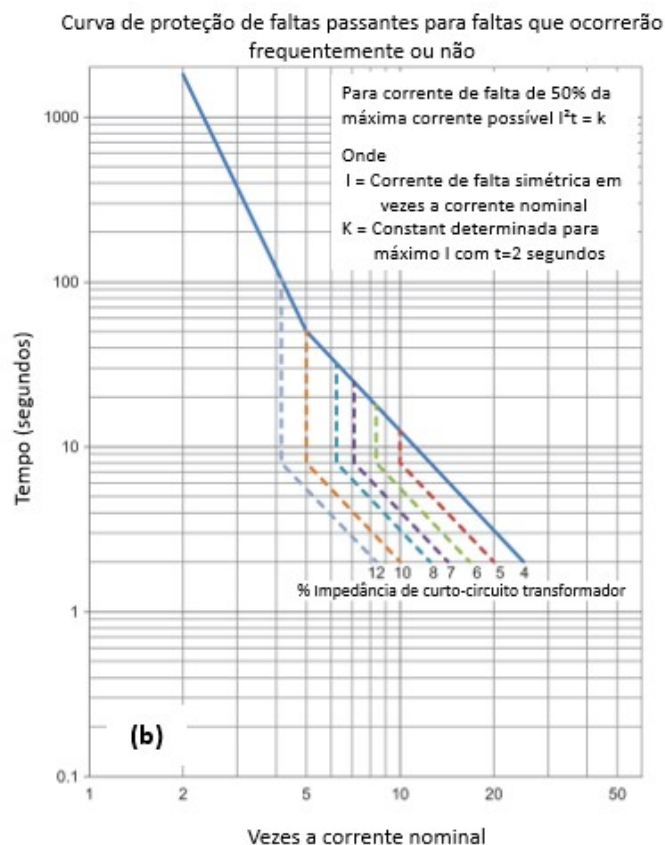
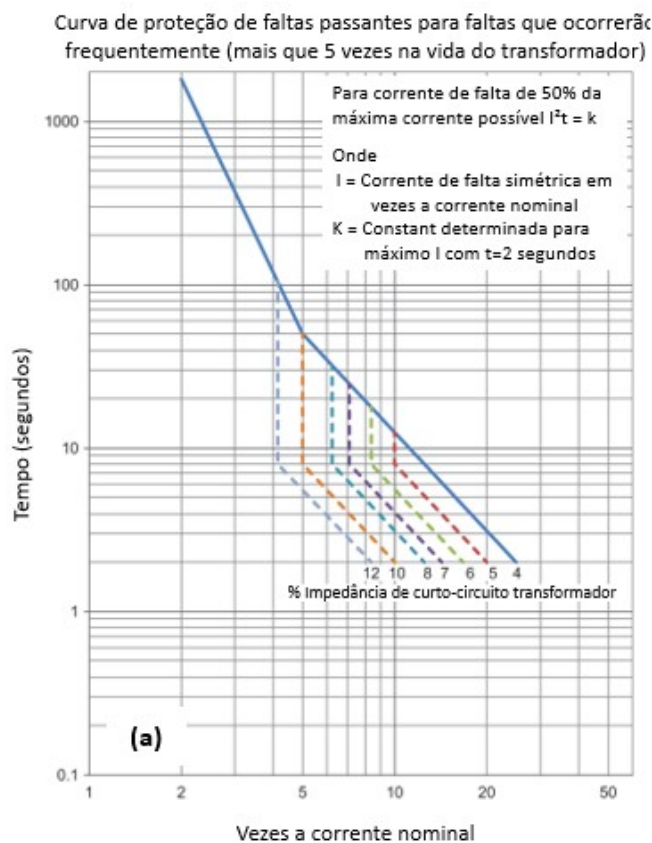


Figura 06 – Curvas de danos térmicos e mecânicos para Transformadores de Potência: (a) potência entre 5.001kVA a 30.000kVA; (b) potência acima de 30.000kVA

2. Desenvolvimento

A Energisa Sergipe Distribuidora está situada na região nordeste do Brasil, possui aproximadamente 825 mil clientes, 56 transformadores de potência totalizando 967MVA, distribuídos em 33 subestações. Todos os bays de conexão de linha e de equipamentos existentes nas subestações estão equipados com sistemas de proteção, compostos por alguns equipamentos, entre eles os IEDs – *Intelligent Eletronic Device* (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes) que exercem função de automação e proteção, sendo possível garantir a seletividade da proteção, o monitoramento/comandos remotos e geração/aquisição de dados do sistema em condições normais de operação e durante eventos transitórios.

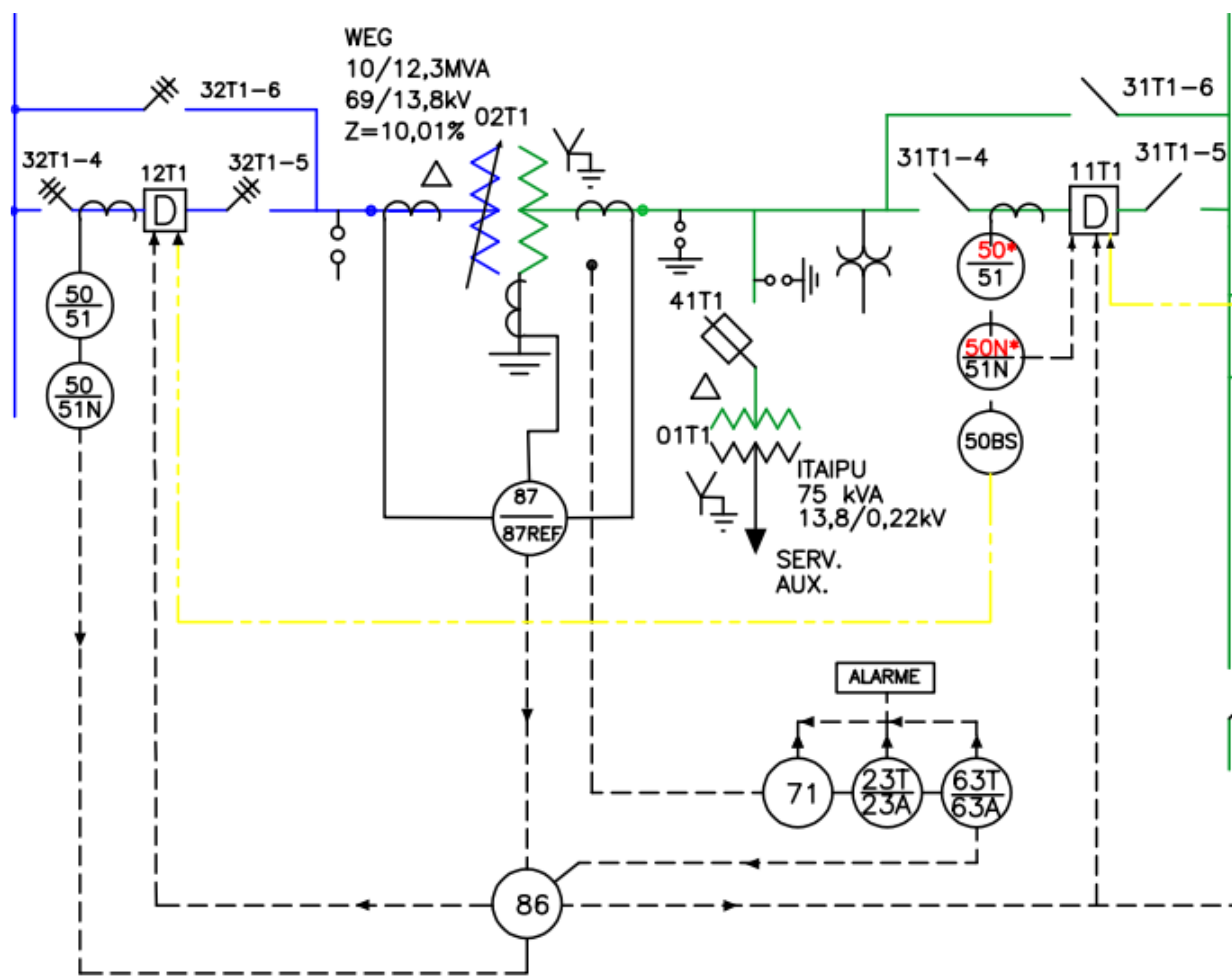


Figura 07 – Diagrama de proteção bay de transformador de potência

Na filosofia adotada pela Distribuidora, os transformadores de potência possuem, na sua maioria, 3 IEDs para proteção/monitoramento, conforme representado na figura 07, que se comunicam por meio de rede de telecomunicação dedicada. A rede operativa, como é denominada, tem a função principal de fornecer um ambiente seguro para o tráfego de dados entre os IEDs e o sistema SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition* (Supervisão, Controle e Aquisição de Dados), além de possibilitar o acesso remoto para aquisição de dados. O grande diferencial desse projeto consiste na aquisição, modelagem, classificação e comparação dos dados, com padrão pré-estabelecido pelo Guia IEEE Std C57.109™-2018 para inferir falta passante severa para o transformador de potência estudado e a partir dessa classificação, tomar as medidas preditivas/preventivas subsequentes.

2.1 - Metodologia

Considerando o Transformador de Potência como ponto central de um sistema de distribuição, é possível dizer que há um conjunto de equipamentos/itens a montante e outro conjunto a jusante dele. Falta a montante do Transformador não são alvo desse estudo pois não causam estresse mecânico e térmico. As faltas jusantes, podem ocorrer em diversos pontos existentes no setor secundário da Subestação, bem como nas redes de distribuição. Considerando que a menor impedância existente a jusante do transformador está no terminal da bucha secundária, quanto mais próximo o curto-circuito acontecer da bucha secundária do transformador, maior será a magnitude da corrente elétrica durante o evento de curto-circuito.

Partindo do princípio de que as faltas de alta magnitude ocorridas a jusante do transformador de potência são prejudiciais ao equipamento e que todos os dados dos eventos de curto-circuito estão disponíveis nos IEDs das Subestações, visualizou-se a possibilidade de obter informação à partir dos dados brutos, com objetivo principal de preservação do ativo mais valioso do sistema elétrico.

A metodologia implementada consiste em classificar as faltas (curtos-circuitos) em **SEVERAS**, para eventos com magnitude de corrente elétrica superior a 50% da corrente máxima de curto-circuito e **NÃO SEVERAS** para eventos com magnitude de corrente elétrica inferior a 50% da corrente máxima de curto-circuito do transformador de potência, conforme apresentado na figura 08. O limiar de 50% segue as recomendações do guia IEEE Std C57.109™-2018, mostradas anteriormente nos gráficos da figura 06.

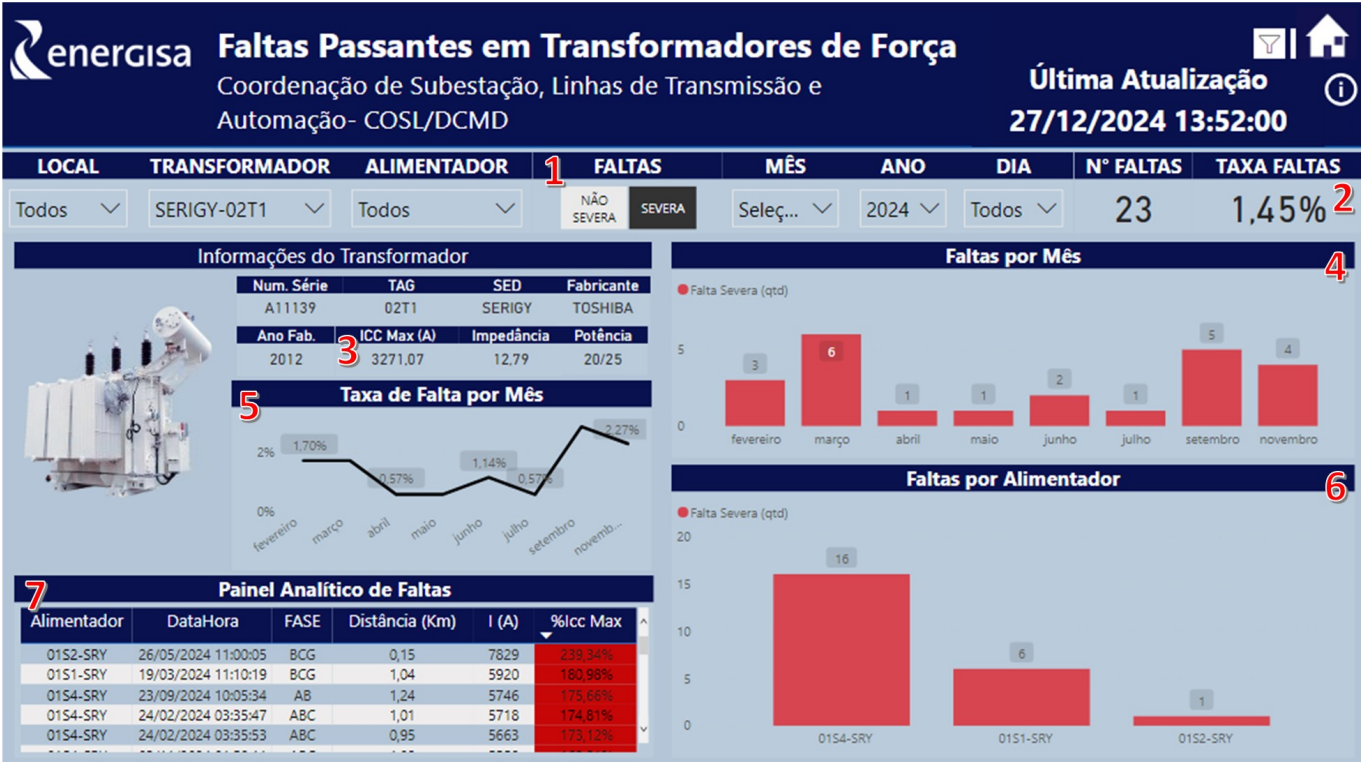


Figura 08 – Ferramenta para análise das faltas passantes em transformadores de potência

A ferramenta traz informações complementares que auxiliam na análise das faltas passantes, tais como:

- 1 – Classificação em faltas Não Severas e Severas
- 2 – Taxa de faltas geral conforme filtros aplicados
- 3 – Indicação do limiar para determinar falta severa ou não severa
- 4 – Gráfico com quantitativo de faltas por mês
- 5 – Gráfico da taxa de faltas por mês
- 6 – Gráfico das faltas X alimentadores onde ocorreu a falta
- 7 – Resumo analítico com os dados extraídos dos IEDs, contendo informações como distância, magnitude, percentual que excedeu (considerando limiar de 50%), fases envolvidas, data e hora dos eventos.

Atualmente, o processo realizado até a obtenção da informação no dashboard consiste na extração dos dados brutos dos IEDs (figura 09), processamento desses dados com algoritmo em *python*, consulta a base de dados de relés, transformadores e subestações e finalizando na manipulação/apresentação dos dados no software *Power BI*, conforme demonstrado no fluxograma da figura 10.

Arquivo		Editar		Exibir				
HIST								
RELIGADOR 21F1								
SE ARACAJU								
Date: 12/04/2024 Time: 12:23:10.057								
Time Source: External								
FID=SEL-751-R300-V3-Z008004-D20210104								
#	REF	DATE	TIME	EVENT	LOCAT	CURRENT	FREQ	TARGETS
1	11246	11/26/2024	10:20:45.741	CG	39.20	300.0	60.0	10000000
2	11245	11/20/2024	11:28:53.426	ER Trigger	12.10	593.8	60.0	10000000
3	11244	11/20/2024	11:28:46.943	AG	11.90	600.3	60.0	10000000
4	11243	11/20/2024	11:28:43.516	AG	10.05	695.7	60.0	10000000
5	11242	11/17/2024	00:05:47.962	CG	14.79	484.9	59.9	10000000
6	11241	11/16/2024	03:26:47.004	ER Trigger	\$\$\$\$	428.5	60.0	10000000
7	11240	11/15/2024	07:34:08.031	BG	21.85	499.2	60.0	10000000
8	11239	11/12/2024	11:47:53.257	BG	10.98	540.8	60.0	10000000
9	11238	11/12/2024	06:25:53.452	BG	8.67	1802.2	60.0	10000000
10	11237	11/12/2024	05:36:07.722	ABG	8.34	1797.4	60.0	10000000
11	11236	11/12/2024	05:36:07.529	BG	10.57	572.0	60.0	10000000
12	11235	11/12/2024	02:55:26.220	ABG	8.34	1760.3	60.0	10000000
13	11234	11/12/2024	02:55:26.012	BG	10.19	1801.8	60.0	10000000
14	11233	11/12/2024	02:55:19.593	BG	10.46	627.9	60.0	10000000
15	11232	11/12/2024	02:55:16.159	BG	10.64	594.9	60.0	10000000
16	11231	11/06/2024	00:35:18.340	ER Trigger	11.32	903.6	60.0	10000000
17	11230	11/03/2024	16:16:09.163	AG	13.77	584.4	60.0	10000000
18	11229	10/23/2024	21:27:09.812	ER Trigger	\$\$\$\$	725.7	59.9	10000000
19	11228	10/23/2024	04:30:31.621	ER Trigger	24.90	536.5	60.0	10000000
20	11227	10/19/2024	14:41:27.694	ER Trigger	15.03	416.3	60.0	10000000
21	11226	10/06/2024	16:36:33.310	ER Trigger	7.10	1553.4	60.0	10000000
22	11225	10/06/2024	11:33:13.168	ER Trigger	11.84	1171.3	60.0	10000000
23	11224	10/03/2024	11:05:18.459	ER Trigger	14.40	971.6	60.0	10000000
24	11223	09/25/2024	14:49:29.475	ER Trigger	22.61	511.7	60.0	10000000
25	11222	09/21/2024	07:14:28.828	CG	13.05	346.5	60.0	10000000

Figura 09 – Dados brutos extraídos dos IEDs

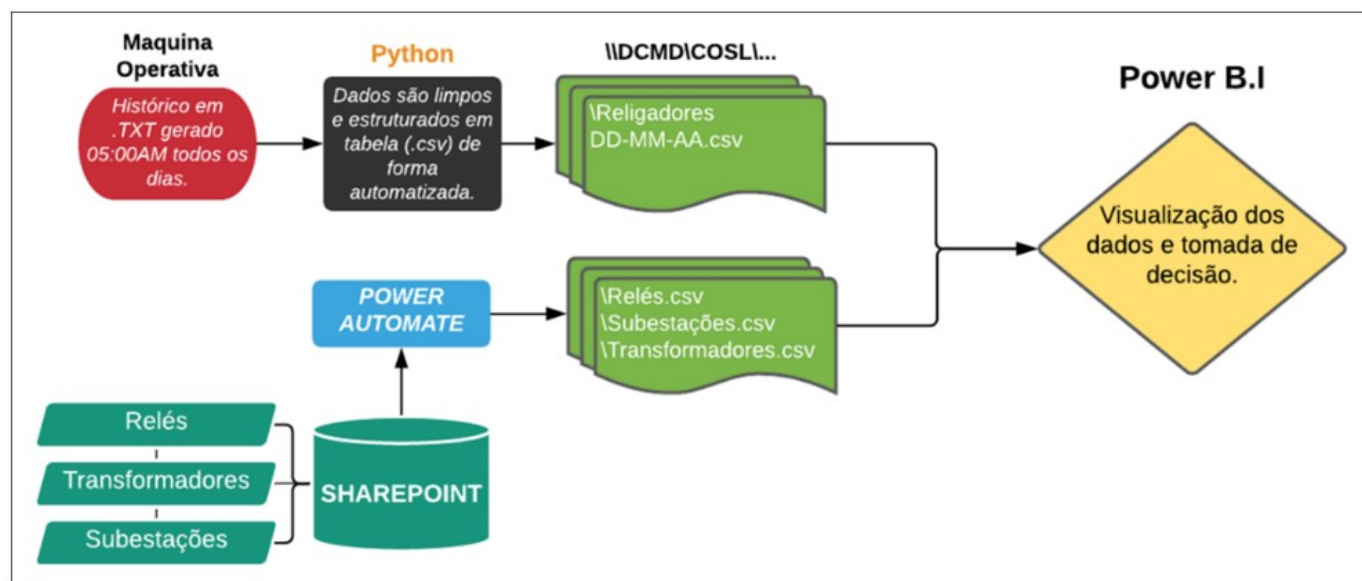


Figura 10 – Fluxograma do processo para aquisição, tratamento e apresentação dos dados de faltas passantes

2.2 – AGD (Análise dos Gases Dissolvidos)

A técnica AGD, abreviação de Análise do Gases Dissolvidos, tem por objetivo identificar, quantificar os gases dissolvidos no óleo mineral isolante do transformador de potência de forma a possibilitar a constatação de anomalias incipientes ou avançadas no equipamento. Esta técnica preditiva é aplicada pela Energisa Sergipe em todos os transformadores de potência, seguindo a norma NDU 029 (Norma de Distribuição Unificada), que orienta a realização do referido teste numa frequência de 1 a 2 vezes ao ano para todos os ativos, independente da criticidade dele, conforme figura 11.

Subestação - SED						
Nome da Inspeção	Unidade	Descrição das Atividades a serem executadas	Priorização de Ativos por Impacto (frequência)			
			Prioridade 1 Crítico	Prioridade 2 Alto	Prioridade 3 Médio	Prioridade 4 Baixo
Inspeção Visual e Termográfica	SED	* Inspeção Visual - verificar: Estruturas, Ferragens Expostas, Isoladores, Vegetação, Edificações, Pontos de Corrosões, Presença de Animais, Abelhas e Ninhos, Tampas e Canaletas, Aterramento, Seccionadoras, Poluição (Agressividade Climática e Industrial), Vazamentos de óleo, Condição Visual dos Ativos, Painéis de Controle. * Inspeção Termográfica - verificar: Presença de Pontos Quentes (Classificação da anomalia conforme nível de temperatura).	100% das SED, 4 ou 3 vezes ao ano	100% das SED, 3 ou 2 vezes ao ano	100% das SED, 3 ou 2 vezes ao ano	100% das SED, 2 vezes ao ano
Coleta de amostra de Óleo para Cromatografia e Físico-química	SED	* Análise físico-química de tanque principal e OLTC de transformadores de força em operação e reservas; * Análise cromatográfica de tanque principal de transformadores em operação;	100% das SED, 2 a 1 vez(es) ao ano	100% das SED, 2 a 1 vez(es) ao ano	100% das SED, 2 a 1 vez(es) ao ano	100% das SED, 2 a 1 vez(es) ao ano

Figura 11 – Frequência das análises de óleo mineral isolante conforme criticidade

O intervalo estabelecido pelo normativo atende as condições normais de operação, porém, na existência de faltas severas que venham a acarretar a iniciação de processo de falha dielétrica, há um *gap* entre as análises que pode favorecer a evolução negativa de um defeito incipiente. Desta forma, outro aspecto abordado neste trabalho, é a aplicação da análise das faltas passantes como gatilho para realização de análise adicional do óleo mineral isolante, com objetivo de identificar, quantificar e classificar a eventual geração de gases combustíveis após a falta passante no transformador de potência.

2.2 – Estudo de caso

A seguir apresentaremos um evento onde a aplicação da análise das faltas passantes foi essencial para o sucesso na detecção precoce dos defeitos encontrados nos transformadores de potência.

· Defeito Transformador de Potência SED Taiçoca

Número de Série: 60.000

Potência: 15/20MVA

Tensão Nominal: 69/13,8kV

Descrição do evento: o referido equipamento foi submetido a falta passante, em decorrência de curto-circuito no alimentador da Subestação Taiçoca, onde o transformador operava. A magnitude da corrente elétrica do evento, caracterizou-a como uma falta severa, requerendo a análise do óleo mineral isolante. A análise detectou 276 ppm de gás acetileno, motivando a decisão imediata de reduzir a carga aplicada ao equipamento e realizar nova análise. A nova análise, concluída no dia n+1 indicou evolução do gás acetileno para 322 ppm, o que levou a decisão de desligar o transformador de potência, evitando falha catastrófica. Abaixo temos as figuras da placa de identificação do equipamento, a parte ativa e o detalhe do defeito ocorrido por conta do efeito mecânico das faltas passantes.

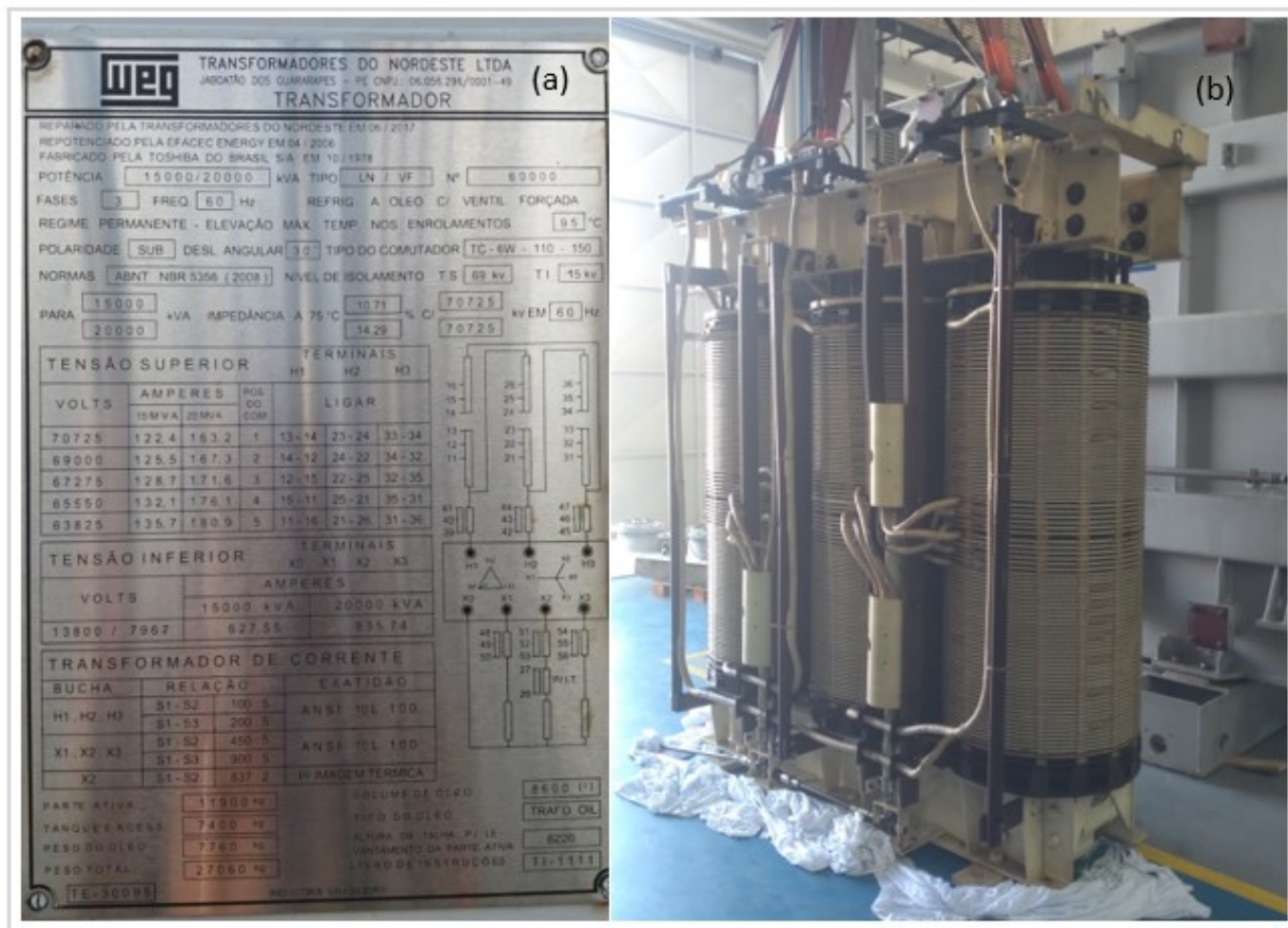


Figura 12 - (a) Placa de identificação; (b) Parte ativa



Figura 13 - Detalhamento do defeito

3. Conclusão

O presente trabalho explanou a respeito da aplicação da Análise de Falhas Passantes em Transformadores de Potência como ferramenta de manutenção preditiva, dando suporte aos demais processos de manutenção preventiva e preditiva com é o caso da AGD.

A combinação das técnicas de análise das falhas passantes e realização de DGA se mostrou eficaz ao ponto de identificar falha incipiente no transformador de potência da SED Taiçoca, conforme demonstrado no estudo de caso deste artigo. De fato, há outra possibilidade de acompanhamento dos gases presentes no óleo mineral isolante, por meio de monitoramento online dos gases, porém esta técnica possui um custo elevado comparando a solução proposta nesse trabalho, onde são coletados dados já existentes nos IEDs. O referido estudo possibilitou aos Engenheiros da Energisa Sergipe visualizar o quão é impactante uma falha severa para a saúde do principal ativo de uma Subestação, ao ponto de serem feitas revisões na aplicação das funções de proteção como HCL – *High Current Lock* e função sobrecorrente para todos os ciclos de religamento, que foram amplamente aplicadas nos IEDs associados aos disjuntores que protegem as redes de média tensão.

A ferramenta também foi aplicada ao processo de planejamento de ativos críticos, como informação complementar aos demais critérios de gestão de ativos, contribuindo para o direcionamento assertivo dos investimentos em transformadores de potência.

Atualmente há uma funcionalidade de acumulado de falhas passantes embarcada nos relés da Schweitzer, porém, não define o que deve ser feito quando o resultado acumulado das falhas passantes chega ao limite superior. O trabalho possui grande potencial para ser aprofundado em trabalhos acadêmicos futuros, que tragam mais robustez ao processo e a tomada de decisão para as equipes de manutenção, bem como analisem a aplicabilidade de NGR – *Neutral Ground Resistor* em transformadores de potência de empresas de distribuição como ferramenta para limitar a corrente de curto-circuito a 50% da corrente máxima de curto-circuito do equipamento, associado a garantia dos rápidos tempos para eliminação das falhas.

4. Referências bibliográficas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 5356-5: “Transformadores de Potência, parte 5, Capacidade de Resistir a Curto-Circuitos”. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 37 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Resolução Normativa Nº 674, de 11 de agosto de 2015, Anexo I. “Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico – MCPSE”. Acesso em 17/01/2025, disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren20221020_2_6.pdf

D’AJUZ, A., “Equipamentos Elétricos - Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão”. Rio de Janeiro, FURNAS/UFF, 1985, p. 53.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. IEEE Standard C57.57.109-2018: “Guide for Liquid-Immersed Transformers Through-Fault-Current Duration. New York: IEEE, 2028. 22 p.

LAFRAIA, J. Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

MAEZONO, P. Curso de Proteção: “Ferramentas de Análise para Engenheiros e Técnicos de Proteção, quarta edição”. São Paulo: Virtus Consultoria, 2009. p. 57.

SELLITTO, M. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. *Produção*, v.15, n.1, p.44-59, 2005.

TENBOHLEN S., HANIF Z., MARTIN D., “Analysis of Major Failures of Power Transformers”, ICTRAM Conference, Split, Croatia, Nov. 2023.

VAHIDI F., TENBOHLEN S., "Statistical Failure Analysis of European Substation Transformers", Conference:
6. ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Nov. 2014.