

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - CAMPUS BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Leonardo Francelino dos Santos

**ANÁLISE E VALIDAÇÃO DOS SISTEMAS DE MONITORAMENTO
DE TRANSFORMADORES DE EXTRA ALTA TENSÃO - UM ESTUDO
DE CASO**

Betim
2026

LEONARDO FRANCELINO DOS SANTOS

**ANÁLISE E VALIDAÇÃO DOS SISTEMAS DE MONITORAMENTO
DE TRANSFORMADORES DE EXTRA ALTA TENSÃO - UM ESTUDO
DE CASO**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Me. Victor Alves Silva e Melo.

Betim
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

S237a Santos, Leonardo Francelino dos

Análise e validação dos sistemas de monitoramento de transformadores de Extra-Alta Tensão: um estudo de caso / Leonardo Francelino dos Santos – 2026.

42 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Victor Alves Silva e Melo

1. Transformadores elétricos. 2. Sistemas elétricos. 3. Manutenção preditiva. 4. Monitoramento elétrico. 5. Engenharia de Controle e Automação. I. Santos, Leonardo Francelino dos. II. Título.

CDU: 621.313

Leonardo Francelino dos Santos

**ANÁLISE E VALIDAÇÃO DOS SISTEMAS DE MONITORAMENTO
DE TRANSFORMADORES DE EXTRA ALTA TENSÃO - UM ESTUDO
DE CASO**

Trabalho de conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

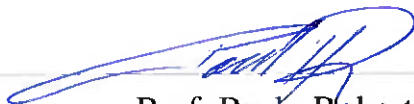
Aprovado em: 04/02/2026 pela banca examinadora:



Prof. Victor Alves Silva E Melo (Orientador) - IFMG



Prof. Dr. Reginaldo Vagner Ferreira – IFMG



Prof. Paulo Roberto Costa e Silva – PUC-MINAS

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste Trabalho de conclusão de curso é o resultado de muito esforço, dedicação e, acima de tudo, do apoio incondicional de pessoas que foram fundamentais durante essa jornada.

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e condições necessárias para conquistar mais essa etapa da minha vida.

Gostaria de agradecer aos meus pais Mario Antônio dos Santos e Onofra Francelina da Silva Santos, que desde o início me ensinaram o valor da educação. O amor, a paciência e os valores que me transmitiram foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Agradeço por todo o apoio, carinho e incentivo, mesmo nos momentos mais difíceis.

À minha esposa Greiciane Mendes Braga dos Santos, obrigado por estar ao meu lado em cada etapa desta caminhada, por compreender minhas ausências e por ser a pessoa que sempre me apoiou incondicionalmente.

Aos meus filhos Maria Luisa e Bernardo, que são a razão do meu esforço e a minha maior motivação. A alegria e o amor que vocês trazem para a minha vida me deram forças para continuar, mesmo quando o cansaço parecia insuportável. Agradeço por cada sorriso e por me lembrarem, todos os dias, o que realmente importa.

Aos meus irmãos Mario, Matheus e Odete, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio, compreensão e companhia. O apoio de vocês, nos bons e maus momentos, foi essencial para que eu mantivesse a motivação e a determinação. Muito obrigado por sempre acreditarem em mim.

A todos vocês, minha eterna gratidão. Este trabalho é tão meu quanto de vocês, pois sem o apoio e o amor de cada um, eu não teria chegado até aqui.

RESUMO

O monitoramento de transformadores de extra alta tensão é essencial para assegurar a confiabilidade do sistema elétrico e prevenir falhas de grande impacto operacional. Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre dois transformadores submetidos a condições reais de anomalia, avaliando a eficácia dos sensores intrínsecos, das proteções mecânicas e do relé multifunção SEL-2414 da Schweitzer na prevenção de danos severos. A metodologia envolveu revisão bibliográfica, levantamento documental, análise de registros de relé, inspeções de campo e comparação direta entre um transformador que evoluiu para incêndio e outro preservado pela atuação imediata das proteções. Os resultados mostram que, no caso em que houve perda total do equipamento, a falta permaneceu sustentada por vários minutos devido à atuação tardia dos dispositivos e à insuficiência da lógica de correlação entre as variáveis monitoradas. Em contraste, o transformador preservado teve desligamento em frações de segundo, evitando elevação térmica, formação de gases e danos estruturais. Constatou-se que a eficácia do monitoramento depende diretamente da correta parametrização, da integração entre sensores e da velocidade de resposta do sistema de proteção. Conclui-se que arquiteturas de supervisão bem configuradas ampliam a disponibilidade dos equipamentos, reduzem riscos operacionais e contribuem para práticas de manutenção preventiva e preditiva mais assertivas.

Palavras-chave: Transformador; Monitoramento; Manutenção preventiva; Transmissão e Distribuição.

ABSTRACT

Monitoring extra-high-voltage transformers is essential to ensuring the reliability of the electrical system and preventing failures with significant operational impact. This study presents a comparative analysis between two transformers subjected to real anomaly conditions, evaluating the effectiveness of intrinsic sensors, mechanical protections, and the Schweitzer SEL-2414 multifunction relay in preventing severe damage. The methodology included a literature review, document analysis, relay record examination, field inspections, and direct comparison between one transformer that evolved into a fire and another that was preserved through the immediate action of protection devices.

The results show that, in the case where the equipment suffered total loss, the fault remained sustained for several minutes due to delayed operation of the devices and insufficient correlation logic among monitored variables. In contrast, the preserved transformer was disconnected within fractions of a second, preventing thermal rise, gas formation, and structural damage. It was found that the effectiveness of monitoring depends directly on proper parameter configuration, integration among sensors, and the response speed of the protection system. It is concluded that well-configured supervision architectures increase equipment availability, reduce operational risks, and contribute to more accurate preventive and predictive maintenance practices.

Keywords: Transformer; Monitoring; Preventive maintenance; Transmission and Distribution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Usina hidrelétrica de Marimbondo, Fronteira - MG.....	14
Figura 2 - Transformador de 440kV -122MVA.....	15
Figura 3 - Transformador de 1975, Subestação de Angra dos Reis - RJ.....	16
Figura 4 - Transformador de 1976, Barro Alto - Go	17
Figura 5 - Transformador de 1976, Itabaiana - SE.....	17
Figura 6 - Analisador de gases	21
Figura 7 - Indicador de nível de óleo	21
Figura 8 - Relé Buchholz	22
Figura 9 - Válvula de alívio de pressão.....	23
Figura 10 - Medição de temperatura por fibra ópticas	23
Figura 11 - Relé SEL 2414 Schweitzer	24
Figura 12 - SEL 2440.....	25
Figura 13 - Sistema para aquisição de dados	26
Figura 14 - <i>Switch</i> de rede.....	27
Figura 15 - Sala de controle	28
Figura 16 - Fluxograma De Monitoramento De Transformadores	29
Figura 17 - Termômetro	30
Figura 18 - Tela sistema de monitoramento.....	32
Figura 19 - Transformador incendiado durante curto-circuito	33
Figura 20 - Transformador preservado após atuação das proteções.....	34
Figura 21- Oscilografias da atuação das proteções	35

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Comparação dos resultados dos dois transformadores.....	36
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP	Sistema Elétrico de potência
EAT	Extra alta tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

kV	Kilovolt
MVA	Megavolt-Ampère
psi	Pounds per square Inch

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos	15
1.2 Justificativa	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Importância do monitoramento	18
2.2 Falhas evitáveis com monitoramento <i>on-line</i>	19
2.3 Dispositivos de monitoramento	20
2.4 Relés multifunção	24
3 METODOLOGIA	28
3.1 Levantamento de dados	30
3.2 Sistema de monitoramento sob análise	30
3.3 Estudo de Caso 1 – Transformador que evoluiu para incêndio	32
3.4 Estudo de Caso 2 – Transformador preservado pela atuação da proteção	33
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	34
4.1 Propostas de melhorias e soluções	38
4.2 Validação periódica dos sensores e testes de coerência	39
5 CONCLUSÃO	40
6 REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Diante da crescente dependência da energia elétrica, a confiabilidade dos sistemas energéticos tornou-se essencial para o funcionamento da sociedade. Desde o simples acender de uma lâmpada até o suporte vital oferecido por hospitais, a estabilidade do fornecimento de energia é um fator decisivo para a qualidade de vida e a segurança da população

Dentro do Sistema Elétrico de Potência (SEP), os transformadores desempenham um papel fundamental em toda a cadeia de distribuição de energia elétrica — desde a geração, passando pela transmissão, até a distribuição. Esses equipamentos permitem que a energia gerada nas usinas seja transportada de forma eficiente e segura até o consumidor final, garantindo qualidade e confiabilidade no fornecimento (Bechara, 2010).

À medida que a energia se aproxima dos centros de consumo, os transformadores de distribuição entram em ação para rebaixar a tensão a níveis seguros e adequados para o uso residencial, comercial e industrial, onde o nível de tensão diminuído de 13,8kV para 220V. Essa adaptação é essencial para o funcionamento correto e seguro de aparelhos eletrônicos, máquinas industriais e outros dispositivos (Bechara, 2010).

Sem os transformadores, o transporte eficiente da energia desde as usinas até os consumidores seria inviável, tornando o fornecimento mais caro e menos confiável. Além disso, esses equipamentos contribuem para a estabilidade da rede elétrica, equilibrando cargas e assegurando a qualidade da energia entregue (Giacomazzi, 2024). Com o crescimento da demanda energética e a expansão das fontes renováveis, o papel dos transformadores torna-se ainda mais relevante, garantindo que a energia, independentemente de sua origem, seja distribuída de forma confiável, segura e eficiente. A Figura 1 apresenta a Usina hidrelétrica de Marimbondo que na divisa de Minas Gerais e São Paulo no percurso do Rio Grande.

Figura 1 - Usina hidrelétrica de Marimbondo, Fronteira - MG



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Com a implementação do monitoramento automatizado de transformadores, espera-se alcançar um aumento significativo na eficiência operacional e na confiabilidade dos sistemas elétricos. A incorporação de sensores inteligentes e plataformas capazes de analisar dados em tempo real possibilita o acompanhamento contínuo das variáveis essenciais, como temperatura, pressão interna, nível de óleo isolante e comportamento elétrico de equipamentos (Bechara, 2010).

Por fim, este acompanhamento favorece a identificação antecipada de anomalias que, se não observadas, poderiam evoluir para falhas severas e custos elevados da manutenção. Assim, o monitoramento deixa de ser apenas uma ferramenta de observação para tornar-se um componente estratégico na gestão dos ativos, permitindo intervenções mais precisas e reforçando práticas modernas de manutenção preventiva e preditiva (Bechara, 2010).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo desse Trabalho de conclusão de curso é analisar a importância da implementação de sistemas de monitoramento em transformadores de potência, com foco na manutenção preventiva e na detecção precoce de falhas e comparar dois ativos: um equipado

com sistemas de monitoramento, que possibilitaram a mitigação de riscos, e outro desprovido desses recursos, cuja evolução resultou em incêndio.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a implementação de relés multifuncionais na proteção e monitoramento de transformadores;
- Avaliar a eficiência de diferentes dispositivos de monitoramento conectados a transformadores;
- Propor melhorias e soluções baseadas nos resultados obtidos para otimizar a operação do transformador;
- Avaliar falhas que poderiam ser evitadas com o monitoramento *on-line*.

1.2 Justificativa

O transformador de Extra Alta Tensão (EAT) é um equipamento extremamente robusto e oneroso, com custos que podem chegar a alguns milhões de reais (Bechara, 2010). Devido a esse elevado investimento, é de suma importância monitorar essa máquina para evitar sinistros que podem ocorrer devido a falhas, manobras executadas indevidamente e manutenções não realizadas. A implementação de um sistema de monitoramento eficaz é fundamental para garantir a segurança e a eficiência operacional do sistema elétrico. A Figura 2 apresenta um transformador de potência trifásico.

Figura 2 - Transformador de 440kV -122MVA



Fonte: Elaborado pelo autor, 2013

Com as devidas manutenções, o transformador pode funcionar por até 50 anos sem a necessidade de reformar a parte ativa do equipamento (Vendrameto, 2023). Essa longevidade não apenas maximiza o retorno sobre o investimento, mas também assegura a continuidade do fornecimento de energia elétrica, minimizando os riscos de interrupções e acidentes. Portanto, a gestão adequada e a manutenção preventiva dos transformadores de EAT são essenciais para garantir a integridade do sistema elétrico, promovendo a segurança e a confiabilidade no fornecimento de energia em larga escala.

Como evidência da longevidade operacional dos transformadores de potência, observa-se, na Figura 3, um equipamento fabricado em 1975 que permanece em operação há 51 anos. De forma semelhante, a Figura 4 apresenta um transformador fabricado em 1976, ainda em funcionamento, enquanto a Figura 5 exibe outro transformador, também datado de 1976, que continua operando adequadamente. Esses exemplos ilustram a durabilidade e a robustez desses equipamentos.

Figura 3 - Transformador de 1975, Subestação de Angra dos Reis - RJ



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Figura 4 - Transformador de 1976, Barro Alto - Go



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Figura 5 - Transformador de 1976, Itabaiana - SE



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os transformadores de Extra Alta Tensão (EAT) são componentes fundamentais na transmissão de energia elétrica, responsáveis pela conversão de diferentes níveis de tensão e pela conexão entre usinas geradoras e centros consumidores. Devido à relevância e ao alto custo dos transformadores, a adoção de sistemas de monitoramento eficazes é crucial para assegurar a proteção e operação segura e eficiente desses dispositivos (Bechara, 2010).

2.1 Importância do monitoramento

A investigação de falhas em transformadores é um campo que busca compreender as causas e os tipos de falhas mais frequentes, possibilitando a implementação de ações preventivas. A manutenção adequada e o monitoramento sistemático podem prolongar a vida útil dos transformadores, permitindo que operem por até 50 anos sem a necessidade de reformas na parte ativa (Bechara, 2010).

O monitoramento contínuo também se mostra fundamental porque muitos mecanismos de degradação interna não produzem sinais visíveis até estágios avançados de falha. Estudos apontam que processos como envelhecimento térmico do isolamento, formação de gases decorrentes de descargas parciais e esforços mecânicos repetitivos são progressivos e podem ser detectados muito antes de resultarem em uma interrupção não programada (Santos, 2009).

Além dos aspectos técnicos, o monitoramento adequado possui relevância direta na gestão do ciclo de vida dos transformadores, influenciando decisões de manutenção, reforma ou substituição. Como equipamentos de alto valor e grande impacto sistêmico, falhas inesperadas geram custos expressivos, tanto pela perda de receita quanto pela indisponibilidade de instalação (Vendrameto, 2023).

Ainda, segundo Vendrameto (2023), avaliações recentes mostram que técnicas de supervisão contínua auxiliam a prolongar a vida útil das máquinas de grande porte, contribuindo para a sustentabilidade financeira das concessionárias. De maneira complementar, práticas modernas de ensaios e testes das proteções intrínsecas fortalecem a confiabilidade operacional, garantindo a resposta adequada a condições anormais e evitando que pequenos desvios evoluam para falhas severas, considera-se de fundamental importância, que os sistemas de monitoramentos, permitam a entrega de diagnósticos, para conhecimento do estado de saúde dos transformadores (Filho *et al.*, 2024).

2.2 Falhas evitáveis com monitoramento *on-line*

A aplicação de sistemas de monitoramento *on-line* em transformadores de potência tem como principal objetivo reduzir a ocorrência de falhas catastróficas por meio da detecção precoce de anomalias. Por meio da leitura contínua de parâmetros elétricos, térmicos e mecânicos, torna-se possível identificar desvios que antecedem boa parte das falhas internas conhecidas na literatura técnica (Bechara, 2010).

Entre as anomalias que podem ser prevenidas, os defeitos térmicos figuram entre os mais recorrentes, as tendências de aquecimento anormal costumam ser precedidas por elevação gradual na temperatura do óleo, mudanças no comportamento do sistema de resfriamento e aumento de gases associados à degradação térmica, como hidrogênio ou etano (Santos, 2009).

Outro conjunto de falhas evitáveis está relacionado às buchas capacitivas, que estão entre os elementos mais críticos do transformador, alterações progressivas na capacitância. Tangente delta ou ângulo de corrente de fuga são fortes indícios de deterioração do dielétrico (Giacomazzi, 2024). Pesquisas recentes mostram que essas variáveis apresentam comportamento previsível ao longo do processo de degradação, e que o monitoramento *on-line* permite identificar esse padrão com antecedência suficiente para substituição planejada do componente.

Falhas de natureza dielétrica e mecânica também podem ser evitadas pela supervisão em tempo real, eventos como formação de gás no interior do tanque, variações súbitas de pressão e deslocamentos anormais de óleos são detectáveis por sensores intrínsecos, como Buchholz e Válvula de alívio de pressão. Assim, os testes de verificação dessas proteções destacam que sua atuação rápida é decisiva para impedir a progressão de defeitos intensos para falhas de grande porte, especialmente equipamentos de alta tensão (Giacomazzi, 2024).

Além da prevenção de falhas diretas, o monitoramento contínuo favorece a gestão do ciclo de vida do equipamento. A análise histórica dos dados permite identificar transformadores que apresentam tendência acelerada de degradação, contribuindo para uma tomada de decisão mais alinhada à gestão de ativos, evitando intervenções de emergência e reduzindo custos associados à substituição prematura ou ao reparo corretivo de alta complexidade (Vendrameto, 2023).

Assim, observa-se que o monitoramento *on-line* não apenas amplia a capacidade de antecipação de defeitos, como também reorganiza a estratégia de manutenção do transformador, deslocando o foco da atuação reativa para um modelo preventivo e prognóstico.

2.3 Dispositivos de monitoramento

A confiabilidade operacional dos transformadores de potência está diretamente associada à capacidade do sistema de monitoramento em identificar, interpretar e comunicar condições anormais antes que evoluam para falhas severas. A avaliação dos dispositivos instalados no transformador exige considerar não apenas a capacidade individual de cada sensor, mas também o modo como esses elementos se integram à proteção, ao relé e, posteriormente, ao ambiente supervisorio (Vendrameto, 2023).

Os dispositivos intrínsecos, como o Relé Buchholz, Válvula de alívio de pressão, indicadores de temperatura do óleo e sensores de nível, constituem a primeira barreira de proteção do transformador. Esses elementos foram amplamente avaliados em estudos relacionados ao desempenho das proteções internas, que destacam a importância da leitura rápida e confiável desses sinais para evitar a progressão de falhas internas, especialmente aquelas associadas a descargas, aquecimento localizado ou movimento anormal de óleo (Filho *et al.*, 2024).

No caso de monitoramento das buchas, a literatura demonstra que esse é um dos componentes mais sensíveis no transformador, responsável por uma parcela significativa dos eventos de falha em equipamentos de alta tensão. Estudos recentes evidenciam que variações na capacitância, no fator de dissipação e nas correntes de fuga são indicadores antecipados de deterioração da isolação, e que o monitoramento contínuo permite detectar desvios antes que o componente atinja um estado crítico (Giacomazzi, 2024).

A avaliação realizada em pesquisas dedicadas aos diagnósticos de faltas demonstra que o acompanhamento de dados como hidrogênio, metano, etileno e acetileno é determinante para reconhecer falhas incipientes relacionadas a aquecimento e descargas internas (Santos, 2009). Assim, a incorporação desses dados ao ambiente digital do transformador fortalece a tomada de decisão e aumenta a precisão na priorização de intervenções.

Como aborda (Vendrameto 2023), o ciclo de vida dos transformadores reforça que decisões técnicas e econômicas só podem ser adequadamente tomadas quando há registro histórico consistente, correlação entre parâmetros e capacidade de análise contínua dos dados provenientes do ativo.

Por fim, os sistemas que permitem integração via protocolos modernos, disponibilização de tendências, alarmes classificados por criticidade e exportação de registros em tempo real contribuem diretamente para a redução do tempo de resposta da operação (Vendrameto, 2023).

A existência de um canal confiável entre o transformador e o centro de monitoramento é determinante para que o conjunto de sensores cumpra sua função preventiva.

Os sistemas de monitoramento de transformadores de EAT utilizam diversas técnicas e tecnologias. Entre os métodos mais comuns estão:

- Analisador de gases dissolvidos no óleo isolante: A avaliação do óleo isolante é uma das principais abordagens para verificar a condição do transformador. Essa técnica permite a detecção de contaminação e degradação do óleo, que são sinais de problemas potenciais (Bechara, 2010), na Figura 6 apresenta modelo de analisador de gases.

Figura 6 - Analisador de gases



Fonte: REINHAUSEN, 2026

- Indicador de nível de óleo: Trata-se de um dispositivo instalado no transformador com a finalidade de monitorar o nível de óleo presente no tanque de expansão. Sua principal função é identificar condições de falta de óleo, evitando que o transformador opere sem a quantidade adequada para realizar a refrigeração e a isolação da parte ativa. Além disso, o indicador auxilia durante o processo de enchimento do equipamento, prevenindo o enchimento excessivo e garantindo que apenas o volume necessário de óleo seja adicionado, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Indicador de nível de óleo

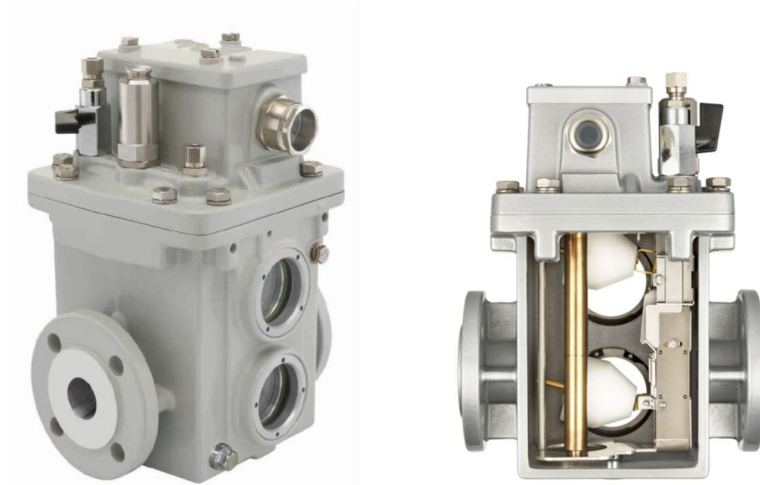


Fonte: REINHAUSEN, 2026

- Relé Buchholz: Esse dispositivo é fundamental para a proteção de transformadores imersos em óleo, pois permite a detecção precoce de falhas internas, evitando danos severos ao equipamento e prevenindo possíveis interrupções no fornecimento de energia. Uma atuação rápida diante de um alarme do relé Buchholz pode evitar reparos de alto custo e contribuir significativamente para o aumento da vida útil do transformador.

O relé funciona por meio da detecção do acúmulo de gases gerados por falhas incipientes ou pelo deslocamento abrupto do óleo durante ocorrências mais graves. Nessas situações, seus flutuadores de corpo sólido integrados são acionados, enviando sinais correspondentes aos estágios de alarme e desligamento do transformador, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Relé Buchholz



Fonte: REINHAUSEN, 2026

- Válvula de alívio de pressão em transformadores: é crucial para a segurança, pois essa válvula previne explosões ao liberar pressão excessiva acumulada dentro do tanque. O monitoramento adequado da válvula garante a proteção do transformador e evita danos graves (Bechara, 2010);

Quando a pressão interna atinge o valor de resposta predefinido, normalmente entre 4 e 30 psi, as placas da válvula e o pino de sinal são acionados, promovendo a abertura imediata do mecanismo. Nesse momento, os contatos de comutação principais atuam em aproximadamente 2 milissegundos, assegurando uma resposta extremamente rápida. Após o alívio da pressão, o *design* robusto e as molas calibradas garantem que o dispositivo retorne ao estado fechado de forma segura e confiável, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Válvula de alívio de pressão



Fonte: REINHAUSEN, 2025

Sensores de Fibras Ópticas: Tecnologias mais avançadas, como sensores de fibras ópticas, têm sido implementadas para monitorar a temperatura em tempo real, detecta com precisão a temperatura do enrolamento. O sistema detecta imediatamente um aumento na temperatura do enrolamento ou um ponto quente, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Medição de temperatura por fibra óptica



Fonte: REINHAUSEN, 2026

Com a implementação de sistemas de monitoramento oferece diversos benefícios, incluindo:

- **Redução de Custos:** A identificação precoce de problemas possibilita a realização de manutenções programadas, evitando reparos emergenciais que podem ser muito mais dispendiosos;
- **Aumento da Confiabilidade:** Com um monitoramento eficaz, a confiabilidade do sistema elétrico é significativamente aumentada, reduzindo o risco de falhas e interrupções no fornecimento de energia;
- **Melhoria na Gestão de Ativos:** O monitoramento contínuo fornece dados valiosos que podem ser utilizados para a gestão de ativos, permitindo decisões informadas sobre manutenção e substituição de equipamentos.

2.4 Relés multifunção

O monitoramento *on-line* de transformadores permite o acompanhamento em tempo real de parâmetros críticos, como temperatura, nível de óleo, pressão e concentração de gases. Para garantir a eficiência desse processo, é essencial a coleta precisa dos sinais gerados pelos dispositivos de proteção, incluindo sensores térmicos, de nível, de pressão e relés de gás. Esses dados são fundamentais para a análise do desempenho operacional, a detecção precoce de falhas e a tomada de decisões preventivas.

A aplicação de relés no monitoramento dos transformadores evoluiu gradativamente com o uso dos dispositivos digitais capazes de reunir medições, supervisionar elementos mecânicos e executar lógicas de controle em uma única plataforma. Esses equipamentos, destacam-se o SEL-2414 apresentado na figura 11, utilizado pela unidade central de aquisição e tratamento dos sinais do transformador, e os módulos SEL-2505 e SEL-2440, que atuam como expansores de entradas e saídas digitais (Silva *et al.*, 2021).

Figura 11 - Relé SEL 2414 Schweitzer



Fonte: Schweitzer, 2025

Enquanto o SEL-2414 consolida informações térmicas, elétricas e mecânicas, os módulos SEL-2505 e SEL-2440 apresentados na figura 12, ampliam a capacidade do sistema

ao permitir a integração de um maior número de sensores e dispositivos auxiliares (Silva *et al.*, 2021). Ainda, segundo o autor, essa combinação forma uma arquitetura robusta, adequada às exigências de proteção e automação presentes em transformadores de potência de alta criticidade, oferecendo suporte eficiente à supervisão contínua e à atuação preventiva.

Figura 12 - SEL 2440



Fonte: Schweitzer, 2025

A modernização dos sistemas de proteção de transformadores de potência tem convergido para a adoção de relés multifunção, no qual a sua capacidade de integrar medições, lógica de supervisão e atuação permite um nível de automação compatível com a criticidade desses equipamentos no sistema elétrico (Santos, 2009). A implementação desses relés está diretamente associada ao modelo atual da operação e manutenção de ativos, que demanda respostas rápidas a eventos normais, rastreabilidade dos sinais processados e integração com estruturas centralizadas de monitoramento.

Assim, a utilização de sensores mecânicos e elétricos nos transformadores, exige um sistema capaz de consolidar essas informações e tratá-las de forma coerente. Os relés assumem um papel ao disponibilizar entradas digitais e analógicas capazes de receber sinais provenientes de proteções intrínsecas, como normalmente é feito nos estudos de ensaios e verificações desses dispositivos em transformadores de alta tensão (Filho *et al.*, 2024).

A implementação do relé SEL-2414 como unidade central de aquisição proporciona um canal único de tratamento das informações oriundas dos módulos periféricos (Santos, 2009). Ainda, segundo o autor, a expansão de entradas garantida pelos dispositivos SEL-2505 e SEL-2440 amplia o escopo de monitoramento, possibilitando a recepção simultânea de sinais de buchas, dispositivos térmicos, válvula de alívio de pressão e relés de gás, o que consolida a arquitetura digital necessária a um sistema de proteção confiável.

Além disso, a atuação dos relés se torna ainda mais relevante diante dos modos de falha típicos de transformadores de potência, como degradação térmica, envelhecimento do sistema isolante, falhas em buchas capacitivas e eventos internos de arco elétrico. Esses mecanismos são amplamente descritos em estudos sobre monitoramento de buchas e comportamento

dielétrico sob condições de estresse, que mostram como variações de capacitância, tangente delta e correntes de fuga podem sinalizar condições de risco elevado (Giacomazzi, 2024).

Outro aspecto determinante é a integração desses relés com ambiente supervisão e com centros de monitoramento de ativos, essa prática em sistemas modernos de monitoramento de buchas e equipamentos de potência demonstra que a centralização das informações facilita o acompanhamento da condição dos ativos e reduz o tempo de resposta diante de anomalias (Santos, 2009).

Neste contexto, os relés tornam-se elementos chave para sustentar a gestão técnica e econômica desses equipamentos, pois permitem registrar eventos, correlacionar sinais e subsidiar análises posteriores. Ao integrar proteções intrínsecas, medições complementares e lógica de supervisão, esses relés ampliam a confiabilidade do transformador, reduzem o tempo de indisponibilidade causado por falhas e reforçam o alinhamento do processo de operação aos princípios da gestão de ativos (Vilanova, 2021).

O relé SEL 2414 é capaz de ler e processar os sinais adquiridos pelas entradas digitais, sendo que os módulos de expansão SEL- 2505 e SEL-2440 ampliam sua capacidade:

- Módulo SEL-2505: Oferece 8 entradas e 8 saídas digitais.
- Módulo SEL-2440: Oferece 16 entradas e 16 saídas digitais.

Esses módulos são essenciais para permitir que o relé SEL-2414 colete sinais de uma grande quantidade de dispositivos e sensores instalados no transformador, como os apresentados na figura 13 (ex.: sensores de gás, temperatura e nível de óleo).

Figura 13 - Sistema para aquisição de dados



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A partir das entradas digitais, o relé pode processar esses sinais e gerar respostas adequadas, como alarmes ou comandos de desligamento para a central de monitoramento do

Para realizar o controle entre o transformador e sala de controle é necessário a conexão do *Switch* à rede de comunicação da sala de controle, dentre as formas de se fazer a comunicação à rede.

Na sala de controle (Figura 15), os operadores têm acesso a uma interface centralizada, através de plataformas de gerenciamento específicas, onde podem monitorar em tempo real os parâmetros críticos do transformador.

Figura 15 - Sala de controle



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Na sala de controle são monitorados itens como temperatura do óleo e enrolamento, nível de óleo, pressão interna, concentração de gases dissolvido e desempenho do comutador de tap. Esses dados são essenciais para a tomada de decisões rápidas, garantindo que os operadores possam antecipar problemas e agir proativamente para evitar falhas maiores.

Com a leitura dos dados, o relé multifunção, ao detectar qualquer irregularidade, aciona alarmes ou até mesmo envia comandos de desligamento automáticos, visando proteger o transformador contra condições adversas como sobreaquecimento, curtos-circuitos, ou degradação do isolamento.

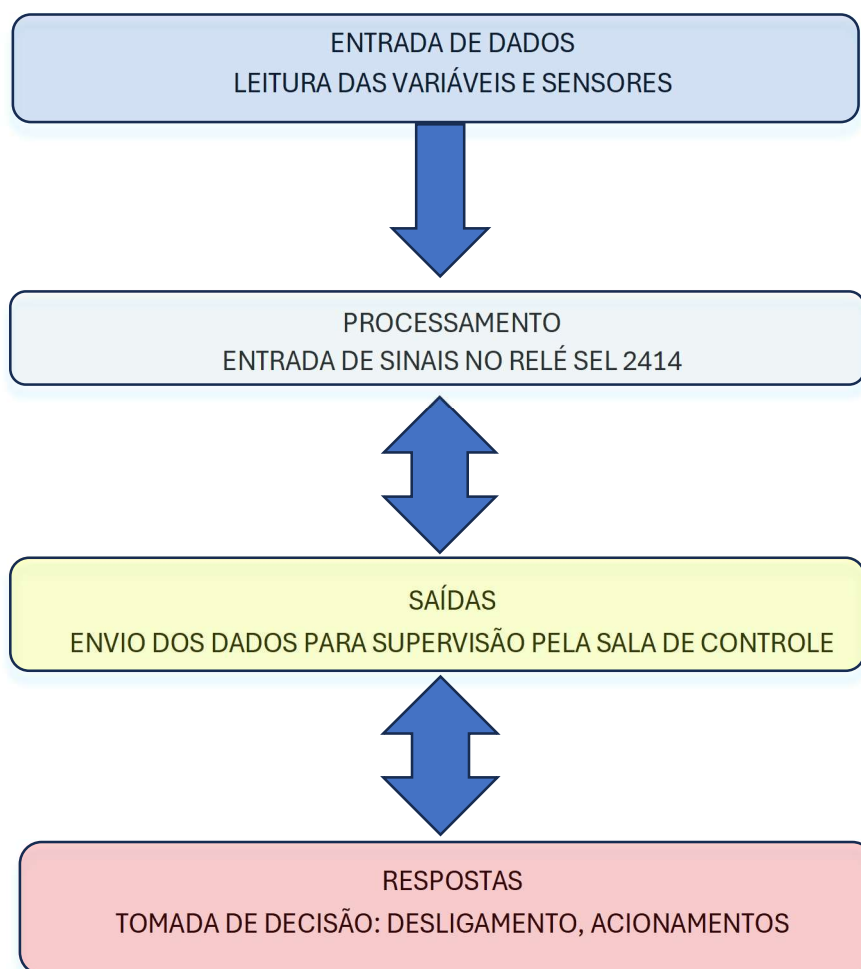
3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em etapas que permitiram compreender tanto o funcionamento dos sistemas de monitoramento aplicados a transformadores de potência quanto o comportamento desses equipamentos diante de condições reais da operação. O estudo foi desenvolvido com base em revisão técnica, análise de documentação especializada, avaliação de relatórios de campo e interpretação de dados provenientes de sistema de proteção e monitoramento.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica direcionada às práticas de supervisão, proteção e diagnóstico de transformadores, contemplando conceitos de manutenção preditiva, análise de fases dissolvidos, monitoramento térmico e funcionamento dos relés dedicados ao acompanhamento das condições operacionais. Essa etapa forneceu o embasamento teórico necessário para relacionar o comportamento físico dos equipamentos às variáveis monitoradas.

O fluxograma figura 16 apresenta a estrutura básica do processo de monitoramento de transformadores, evidenciando o fluxo operacional desde a aquisição das variáveis pelos sensores até a geração de diagnósticos e a tomada de decisões. Essa representação sintetiza as etapas principais que compõem os sistemas modernos de supervisão, integrando leitura de dados, processamento das informações, produção de análises e execução de ações preventivas ou corretivas.

Figura 16 - Fluxograma De Monitoramento De Transformadores



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026

3.1 Levantamento de dados

Além das referências bibliográficas, foram realizadas análises diretas de documentos técnicos, relatórios de evento, registros de relé, fotografias e inspeções de campo referentes aos transformadores avaliados. Este processo envolveu a avaliação do ambiente de instalação; caracterização das condições operacionais antes e durante as falhas; análise de grandezas elétricas; análise dos registros de eventos emitidos pelo sistema supervisório; e estudo dos sensores mecânicos e elétricos instalados nos transformadores.

Os dados forneceram informações complementares que não são descritas em normas ou literaturas, como: comportamento real dos cabos durante uma falta sustentada, dinâmica térmica e mecânica durante o evento, respostas dos operadores, atraso entre alarmes e desligamento, e atuação de dispositivos mecânicos intrínsecos.

3.2 Sistema de monitoramento sob análise

O sistema estudado é composto por sensores mecânicos, sensores elétricos e relés multifunção responsáveis pela aquisição de dados e execuções das proteções. Os componentes avaliados incluem:

- a) Sensores mecânicos intrínsecos ao transformador
 - Relé Buchholz (função 63), figura 8.
 - Indicadores de nível, figura 7.
 - Válvula de alívio, figura 9.
 - Termômetros e PT-100, figura 17.

Figura 17 - Termômetro



Fonte: REINHAUSEN, 2025

b) Sensores elétricos

- Transformadores de corrente (TCs) e de potencial (TPs);
- Sinais trifásicos de corrente e tensão enviados ao relé;
- Entradas digitais representando atuação de dispositivos mecânicos.

c) Sistema de proteção e automação

- O relé multifunção utilizado (como o SEL-2414 ou similar) executa funções como:
- 50/51 — Sobrecorrente instantânea e temporizada;
- 51G — Sobrecorrente de terra;
- 87 — Proteção diferencial;
- 63 — Buchholz;
- 59N/G — Sobretensão no neutro/terra;
- Lógicas internas de correlação entre alarmes térmicos, mecânicos e elétricos.

O sistema monitoramento apresentado é uma interface de supervisão e controle destinada ao transformador, permitindo o monitoramento em tempo real de variáveis operacionais, alarmes e dispositivos auxiliares. A tela consolida informações essenciais para diagnóstico rápido, operação segura e tomada de decisão em subestações.

Na figura 18 é possível identificar as sinalizações descritas, como na parte superior esquerda é possível verificar a parte de controle do transformador, com as indicações de proteções do comutador, proteções de temperatura, sinalizações dos acessórios (Buchholz, válvula de alívio de pressão e indicador de nível de óleo) e do relé 2414. Na parte inferior são apresentadas as grandezas de tensão, posição de Tap, modo de operação e comando, temperaturas do comutador, óleo e enrolamentos. Na parte direita estão os controles para acionamento da ventilação forçada, para o primeiro estágio de ventilação, segundo estágio e modo de operação.

Figura 18 - Tela sistema de monitoramento

COMANDO DO EQUIPAMENTO

CONTROLE DO TRANSFORMADOR

Comut.-Em Operação
Comut.-Alívio de Pressão
Comut.-Proteção
Comut.-Disj. Cmd. Ligado
Comut.-Disj. Motor Desligado
Comut.-Falta Tensão Controle
SEL 2414 Disj. Desligado
Nível Mínimo de Óleo Trafo
Nível Máximo de Óleo Trafo
Comut. Proteção Sobrecorrente
Comut. Proteção Sub/Sobretensão

Temp. Alta Óleo Trafo
Temp. Alta Enrol. Trafo
Acionamento com Defeito
Estado Bloq./Emergência
Detector de Gás
Transf. Alívio de Pressão
Reg.Tensão DJ Desligado
Proteção Atuada SR787(94)
Relé de Bloq. (86) Atuado
Relé Buchholz Atuado
Comut.-Nível Mínimo de Óleo
Comut.-Nível Máximo de Óleo

CONTROLE DA VENTILAÇÃO FORÇADA

VF - Comando Bloqueado
VF - Falta Tensão de Controle
VF - DJ Comando Desligado

MODO DE OPERAÇÃO
LOCAL
CONTROLE MANUAL/AUTOMÁTICO
DESLIGADO
AUTOMÁTICO MANUAL

ESTÁGIO 1
DESLIGADA
LIGAR DESLIGAR
Defeito Ventilação NORMAL
Resfriamento DESLIGADO

ESTÁGIO 2
DESLIGADA
LIGAR DESLIGAR
Defeito Ventilação NORMAL
Resfriamento DESLIGADO

Tensão 13.837 V
Posição do TAP 11
ELEVAR ABAIXAR
MODO DE OPERAÇÃO REMOTO
CONTROLE MANUAL/AUTOMÁTICO MANUAL AUTOMÁTICO

TEMPERATURAS
COMUTADOR 1 34 °C
COMUTADOR 2 34 °C
COMUTADOR 3 34 °C
ENROLAMENTO 36 °C
ENROLAMENTO E ÓLEO 36 °C
ANALISADOR DE GÁS 0 % 0 %

CONTROLE INDIVIDUAL
MESTRE/COMANDADO/INDIVIDUAL
INDIVIDUAL
MESTRE INDIVIDUAL

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Em conjunto, o SCADA oferece uma visão integrada da condição operacional do transformador, contribuindo para a confiabilidade, segurança e continuidade do serviço elétrico.

Nas seções 3.3 e 3.4 serão apresentados dois casos de transformadores que tiveram sinistros, um sem a atuação do sistema e com a atuação do sistema protegendo o transformador.

3.3 Estudo de Caso 1 – Transformador que evoluiu para incêndio

Este estudo analisa um transformador que sofreu falha grave no circuito terciário e permaneceu energizado por um período prolongado, resultando em incêndio e danos estruturais. Foram avaliados:

- registros de corrente e tensão no instante da falha;
- alarmes gerados pelos sensores mecânicos;
- atuação (ou ausência de atuação) das proteções elétricas;
- oscilografias e logs internos do relé;
- sequência temporal da falha;
- danos físicos observados após o evento.

A metodologia consistiu em reconstruir a progressão da falha e analisar o comportamento das proteções para identificar por que o transformador continuou em operação mesmo em condição crítica, conforme figura 19:

Figura 19 - Transformador incendiado durante curto-circuito



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

3.4 Estudo de Caso 2 – Transformador preservado pela atuação da proteção

O segundo estudo de caso apresenta um transformador submetido a uma anomalia elétrica semelhante, porém com atuação imediata da proteção, impedindo a evolução da falha. Foram avaliados:

- registros do relé multifunção;
- alarmes de sobrecorrente, pressão ou Buchholz;
- comportamento térmico e elétrico;
- tempo de atuação das proteções;
- inspeção visual após o desligamento;
- integridade de cabos, muflas, acessórios e óleo isolante.

Essa estrutura permitiu identificar como a lógica de proteção atuou e preservou a integridade do equipamento, conforme figura 20:

Figura 20 - Transformador preservado após atuação das proteções



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Após a análise individual de cada transformador, aplicou-se uma abordagem comparativa para compreender os fatores determinantes para o desfecho de cada evento. Os critérios estabelecidos foram: tempo de resposta das proteções; comportamento das correntes e tensões; atuação dos sensores mecânicos; integridade dos cabos e conexões; evidências físicas pós-evento; lógica e parametrização do relé; e integração com o sistema supervisor.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

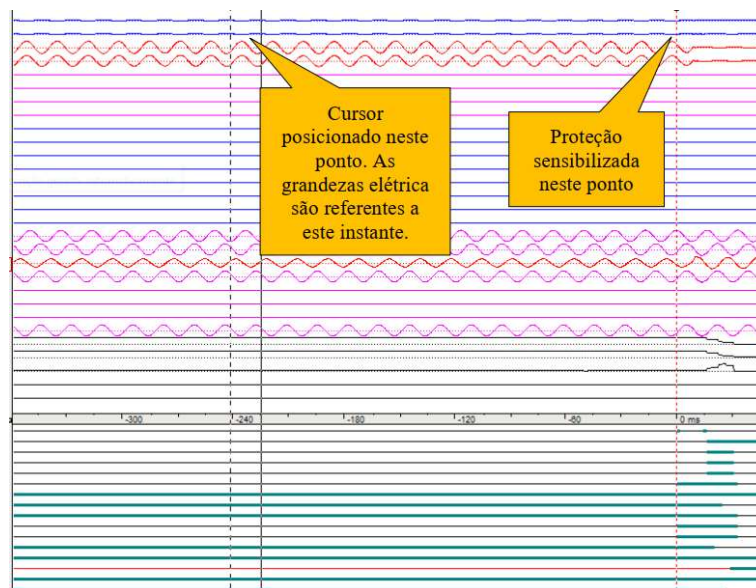
Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da análise comparativa dos dois estudos de caso realizados: o transformador que evoluiu para incêndio e o transformador preservado pela atuação adequada das proteções.

Os resultados obtidos a partir dos dois estudos de caso analisados demonstram comportamentos distintos dos sistemas de monitoramento e proteção aplicados a transformadores de extra alta tensão. A partir da coleta de dados operacionais, registros de relé,

sinais elétricos, respostas de sensores mecânicos e inspeções físicas posteriores aos eventos, foi possível caracterizar objetivamente a evolução das anomalias e os efeitos diretos da atuação ou não dos protetores.

No primeiro caso, relacionado ao transformador que evoluiu para incêndio, verificou-se que o equipamento permaneceu energizado mesmo após o início das condições de curto-circuito, conforme gráfico apresentado na figura 21:

Figura 21- Oscilografias da atuação das proteções



Fonte: Relatório de falha do transformador, 2023

Os registros de corrente indicaram valores sustentados superiores a 2,2KA no circuito terciário, caracterizando um curto-circuito mantido. Essas condições são coerentes com o que a literatura descreve: falhas internas sem interrupção imediata tendem a produzir crescentes efeitos térmicos e dielétricos, acumulando energia no sistema (Bechara, 2010).

Os alarmes mecânicos registraram atuação tardia do Relé Buchholz, fenômeno que também encontra respaldo na literatura, uma vez que a formação de gases combustíveis depende do tempo de exposição do óleo a temperaturas elevadas (Vilanova, 2021). Indicadores de nível apresentam sinais incompletos, situações compatíveis com eventos de rápida degradação térmica, nos quais parte dos sensores perde funcionalidade à medida que o incêndio se intensifica. As evidências fotográficas coletas após o evento (figura 19) mostram extensa carbonização de cabos, muflas e parte ativa, além das deformações estruturais.

No segundo estudo de caso (figura 20), que envolve um transformador preservado pela atuação adequada das proteções, os registros apontaram comportamentos opostos. A corrente apresentou um pico inicial associado a uma anomalia incipiente, seguindo a interrupção praticamente imediata. A estabilização das tensões logo após o desligamento confirma que a

proteção removeu a energia de falta antes da evolução do defeito. Esse comportamento é consistente com o que Bechara (2010) descreve sobre a importância da correlação rápida entre variáveis para impedir a ampliação de falhas internas.

Os sensores mecânicos apresentaram respostas coerentes com o cenário controlado: o relé atuou de forma imediata, e os demais sensores mantiveram leituras dentro dos limites operacionais, sem qualquer sinal de degradação térmica ou mecânicas significativas. Já com a inspeção visual posterior é possível registrar a ausência de danos físicos, compatível com o desligamento precoce e efetivo, mas é necessário realizar uma inspeção detalhada para verificar possíveis danos no interior do transformador. Na figura 20 demonstram que a preservação dos cabos, muflas e estrutura do tanque, evidenciando que o efeito não chegou a produzir efeitos expressivos sobre a parte ativa do equipamento.

Para fins de síntese, a tabela 1 apresenta os principais resultados documentados nos dois eventos:

Tabela 1 - Comparação dos resultados dos dois transformadores

Parâmetro Avaliado	Transformador que evoluiu para incêndio	Transformador preservado pela proteção
Tempo até o desligamento	Superior a 3 minutos	Inferior a 0,2 segundo
Corrente durante a anomalia	Sustentada, acima de 2,2 kA	Pico breve seguido de interrupção
Comportamento das tensões	Desequilíbrio persistente	Estabilização imediata após a atuação
Atuação do Buchholz	Ocorreu tardiamente	Atuação imediata
Comportamento térmico	Aumento contínuo até perda de sensor	Variação mínima seguida de estabilização
Pressão interna	Elevada, com alívio tardio	Controlada
Integridade dos cabos	Derretidos e carbonizados	Preservados
Condição final do transformador	Perda total	Mantido operacional

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Analisando a tabela acima é possível chegar as conclusões abaixo:

- Tempo de Desligamento: no transformador que evoluiu para incêndio, verificou-se que o desligamento ocorreu após período superior a 3 minutos. A manutenção do

equipamento sob energização durante esse intervalo favoreceu a sustentação da falha e permitiu a progressão dos danos térmicos internos. Em contraposição, no transformador preservado observou-se atuação das proteções em tempo inferior a 0,2 segundo, dentro dos limites previstos para relés de sobrecorrente e diferencial. Essa resposta rápida impediu o avanço da anomalia e mitigou riscos estruturais e térmicos.

- **Corrente Durante o Evento:** o equipamento sinistrado apresentou corrente sustentada acima de 2,2 kA, característica típica de falha interna não extinta pelo sistema de proteção. Esse comportamento acelera a degradação térmica do óleo isolante. Já no transformador preservado registrou-se apenas um pico transitório de corrente, imediatamente suprimido pela atuação dos dispositivos de proteção, o que impediu impactos severos nos componentes internos.
- **Comportamento das Tensões:** no transformador que sofreu incêndio verificou-se desequilíbrio persistente das tensões entre fases, sugerindo assimetria resultante de curto-circuito interno ou degradação crítica de conexões. No equipamento preservado, observou-se estabilização imediata das tensões do sistema elétrico após o desligamento, sinalizando interrupção efetiva da anomalia.
- **Atuação do Relé Buchholz:** no transformador sinistrado, o relé Buchholz atuou de maneira tardia, esse comportamento é condizente com degradação severa do óleo isolante e ocorrência de arcos internos. No transformador preservado, o relé Buchholz operou prontamente, sinalizando sensibilidade adequada à formação inicial de gases e contribuindo para o desligamento precoce do equipamento.
- **Comportamento Térmico:** o transformador afetado apresentou elevação térmica contínua e descontrolada, culminando na perda de leitura dos sensores devido à exposição a temperaturas extremas. Tal cenário evidencia degradação acelerada de componentes internos e do óleo isolante. No transformador preservado, a variação térmica foi mínima e rapidamente estabilizada após a interrupção da energização.
- **Pressão Interna:** foi constatado aumento expressivo da pressão interna no transformador que evoluiu para incêndio, com alívio tardio, fenômeno associado à geração de gases inflamáveis durante falhas internas severas. No transformador preservado, a pressão

mantteve-se dentro dos limites operacionais, uma vez que a atuação precoce dos sistemas de proteção evitou o agravamento das condições internas.

- **Integridade dos Cabos:** os cabos do transformador sinistrado apresentaram derretimento e carbonização, decorrentes da exposição prolongada a altas temperaturas e das correntes elevadas sustentadas durante a falha. No equipamento preservado, os cabos mantiveram suas propriedades físicas originais, sem sinais de degradação térmica.
- **Condição Final dos Equipamentos:** o transformador que evoluiu para incêndio sofreu destruição total, tornando-se irrecuperável. Em sentido oposto, o transformador preservado permaneceu apto à operação após inspeção técnica, evidenciando a eficácia dos sistemas de proteção empregados.

A inspeção física realizada após cada evento reforça a interpretação apresentada, o transformador incendiado apresentou carbonização completa dos cabos e muflas, deformação do tanque e contaminação do óleo isolante, todos os efeitos descritos por Bechara (2010) como resultantes faltas sustentadas. Em contraste, o transformador preservado mostrou total integridade estrutural, confirmando que o desligamento precoce foi suficiente para limitar a progressão do efeito.

Por tanto, as diferenças substanciais no desempenho dos sistemas de monitoramento e proteção. A análise numérica e comparativa mostra que o segundo transformador não foi salvo apenas pela presença dos sensores, mas pela correta parametrização. Assim, este estudo demonstra que a resposta do sistema de proteção é decisiva para determinar de um transformador será preservado ou destruído em eventos de falha interna.

4.1 Propostas de melhorias e soluções

De acordo com os resultados analisados, torna-se evidente que, embora o sistema de monitoramento apresente desempenho satisfatório, existem oportunidades relevantes para aprimoramento da lógica da supervisão, da parametrização dos alarmes e do fluxo operacional. Embora os sensores tenham fornecido informações coerentes, a lógica de supervisão não foi capaz de correlacionar variáveis críticas de forma eficaz. Sendo necessário:

- Ajustar faixas de atuação para temperatura, pressão e nível de óleo, priorizando valores de disparo mais sensíveis;

- Implementar lógica combinada entre sensores térmicos, mecânicos e elétricos para detecção de anomalias simultâneas;
- Reconfigurar atrasos de atuação para evitar que sinais intermitentes ou variações rápidas sejam ignorados pelo sistema;
- Criar alarmes diferenciados por criticidade, permitindo que falhas graves tenham prioridade automática do supervisor.

Com esses ajustes, a lógica aplicada ao SEL-2414 torna-se mais coerente com o comportamento real do transformador e minimiza a probabilidade de falhas não detectadas.

4.2 Validação periódica dos sensores e testes de coerência

Embora os dispositivos mecânicos tenham operado corretamente, analisando o transformador que incendiou mostra que a atuação não foi suficiente para evitar danos significativos. Recomenda-se:

- Realizar testes semestrais de atuação do relé Buchholz, válvula de alívio e indicadores de nível;
- Verificar o comportamento dos sensores sob condições simuladas, comparando com valores de referência;
- Implementar relatórios automáticos que indiquem sensores inativos, fora de faixa ou com comportamento inconsistente;
- Validar o estado dos cabos, terminais e entradas digitais do SEL-2414 para evitar falhas de comunicação interna.

Com a adoção dessas melhorias, o sistema de monitoramento torna-se mais seguro, confiável e alinhado às práticas modernas de gestão de ativos. As ações propostas corrigem fragilidades identificadas na análise dos resultados e reduzem a probabilidade da reincidência de falhas semelhantes à observada no estudo de caso.

5 CONCLUSÃO

A análise dos dois estudos de caso apresentados permitiu demonstrar, a influência direta do sistema de monitoramento e proteção no comportamento de transformadores de extra alta tensão submetidos a condições de falha interna. A comparação entre o transformador que evoluiu para incêndio e aquele preservado pela atuação rápida das proteções confirmou, na prática, o que a literatura já descreve de maneira teórica: a dinâmica de resposta do sistema de proteção é o principal fator responsável por determinar a extensão dos danos.

No primeiro caso, os dados revelaram que a falta permaneceu energizada por mais de três minutos, tempo suficiente para causar degradação térmica acelerada, carbonização de cabos, aumento de pressão e ruptura estrutural. Essa condição se agrava quando há atraso na atuação dos sensores mecânicos ou quando a lógica de supervisão não é capaz de correlacionar adequadamente as variáveis elétricas e mecânicas presentes no sistema.

No segundo estudo de caso, o desligamento ocorreu em menos de 0,2 segundo após a detecção inicial da anomalia. Essa atuação permitiu interromper a energia de falta ainda em estágio incipiente, impedindo a formação de gases, o aquecimento excessivo e a degradação mecânica do equipamento. Como consequência direta, o transformador permaneceu íntegro e operável, comprovando a eficácia da parametrização adequada e da correlação eficiente entre sensores e relé de proteção.

Assim, os resultados obtidos demonstram que a confiabilidade dos transformadores de potência depende não apenas da presença dos dispositivos de monitoramento, mas da forma como esses elementos são configurados, interpretados e integrados entre si. Finalmente, o estudo reforça a importância de manter rotinas de teste, validação periódica de sensores e revisão das lógicas de atuação dos relés. A metodologia aplicada mostrou que mesmo sistemas tecnologicamente avançados podem falhar quando não estão devidamente ajustados às características reais de operação.

6 REFERÊNCIAS

ARANTES, F. M. **Diagnóstico de transformadores de potência através de análises de gases dissolvidos em óleo mineral isolante**. Rio de Janeiro, Brasil. Projeto Submetido ao Corpo Docente do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, janeiro, 2008.

BECHARA, Ricardo. **Análise de falhas de transformadores de potência**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ELETROTRAFO. **Sensor PT-100**. Disponível em: <https://www.eletrotrafo.com.br/sensor-pt100-3-fios-inox-haste-6-x-100mm-rosca-1-2-bsp-cabecote-pequeno-0-300>. Acesso em: 25 set. 2025.

FILHO, Silvio Henrique Silva de Oliveira et al. Testes e ensaios das proteções intrínsecas em transformadores de alta tensão. **Revista Contemporânea**, v. 4, n. 6, p. e4855-e4855, 2024.

GIACOMAZZI, Teodora et al. **Monitoramento de buchas de alta tensão como estratégia de prevenção de falhas em transformadores de potência por meio da utilização de um centro de monitoramento de ativos**. 2024.

REINHAUSEN. **Buchholz Relay Messko MSafe**. Disponível em: <https://www.reinhausen.com/productdetail/buchholz-relays/messko-msafe> Acesso em: 15 jan. 2026.

REINHAUSEN. **Oil Level Indicator Messko MTO**. Disponível em: <https://www.reinhausen.com/filead>. Acesso em: 30 set. 2025.

REINHAUSEN. **Pressure Relief Device Messko MPREC/LMPRD**. Disponível em: <https://www.reinhausen.com/productdetail/pressure-relief-devices/messko-mprec>. Acesso em: 15 jan. 2026.

REINHAUSEN. **Thermometer Messko Compact Series**. Disponível em: <https://www.reinhausen.com/serie/ba/ba15831400pt.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2024.

SANTOS, Leonardo Torres Bispo dos. **Sistema de apoio à decisão para o diagnóstico de falhas em transformadores de potência**. 2009. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES (SEL). **SEL-2414 Transformer Monitor**. Disponível em: <https://selinc.com/pt/products/2414/>. Acesso em: 13 ago. 2024.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES (SEL). **SEL-2440 DPAC Discrete Programmable Automation Controller**. Disponível em: <https://selinc.com/pt/products/2440/>. Acesso em: 15 jan. 2026.

SILVA, Hélio Cardozo da; OLIVEIRA, Janilton Nunes de; FERREIRA, Rafael Vicente. **Sistema de automação para subestação em 138 kv**. 2021. Trabalho de conclusão de curso (Técnico em automação industrial) – Etec Philadelpho Gouvêa Netto, Centro Paula Souza, São José do Rio Preto, 2021.

TREETECH. **Monitor de Buchas BM**. Disponível em: <https://treetech.com.br/wp-content/uploads/202>. Acesso em: 13 ago. 2024.

TREETECH. **Relé de Membrana MBR**. Disponível em: <https://treetech.com.br/wp-content/uploads/2019/11/TreetechMBRcatalogopt8.03.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2024.

TREETECH. **TM1/TM2 – Termômetro Digital**. Disponível em: <https://www.treetech.com.br/tm1-tm2/>. Acesso em: 30 ago. 2024.

URKRAFT. **Bolsa Separadora STP**. Disponível em: <https://urkraft.com.br/stp-bolsa-separadora/>. Acesso em: 13 ago. 2024.

VENDRAMETO, Helen Velozo. **Avaliação do ciclo de vida de transformadores de potência considerando aspectos técnicos, regulatórios e econômicos**. 2023.

VILANOVA, Bianca Reckziegel. **Controle de sobretensões em enrolamentos de transformadores**. 2021.

WEG (2007). **Manual de Instalação e Manutenção para Transformadores à Óleo**. Blumenau, SC, Brasil. Disponível em: <http://www.catalogo.weg.com.br>. Acesso em: 10 out. 2025.