V7.n9.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

O IMPACTO DE INCONSISTÊNCIAS NA INTERFACE FÍSICO-LÓGICA SOBRE A CONFIABILIDADE DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES (ANSI 87T)

THE IMPACT OF INCONSISTENCIES AT THE PHYSICAL-LOGICAL INTERFACE ON THE RELIABILITY OF TRANSFORMER DIFFERENTIAL PROTECTION (ANSI 87T)

EL IMPACTO DE LAS INCONSISTENCIAS EN LA INTERFAZ FÍSICO-LÓGICA SOBRE LA CONFIABILIDAD DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES (ANSI 87T)

Mauricio Guidotti de Souza Junior[1], Valdecy Cardoso dos Santos[2]

e798895
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i9.8895

PUBLICADO: 09/2026

RESUMO

A confiabilidade da proteção diferencial de transformadores depende da coerência entre a filosofia de proteção, a parametrização do Dispositivo Eletrônico Inteligente (IED), os circuitos de corrente e a instalação física. Este estudo analisa, por meio de estudo de caso técnico de natureza qualitativa, os riscos associados a inconsistências na interface físico-lógica da função ANSI 87T. Foram examinados registros de Teste de Aceitação em Fábrica (TAF), Teste de Aceitação em Campo (TAC), ensaios de injeção secundária, documentação de projeto e oscilografias de energização. O método foi reorganizado em protocolo reproduzível de sete etapas, com critérios de rastreabilidade entre documentação, parametrização, circuito físico, equilíbrio vetorial, resposta a faltas e comportamento transitório. Os ensaios monofásicos registraram tempos de atuação entre 0,030 s e 0,033 s, enquanto o evento de campo evidenciou condição de inrush com elevada distorção harmônica e atuação da lógica de bloqueio por forma de onda. A análise mostra que a validação lógica isolada não é suficiente para comprovar a integridade da interface físico-lógica, pois erros de polaridade, faseamento, relação de transformação ou ligação podem permanecer fora do escopo de testes individualizados. Conclui-se que a integração entre TAF, TAC, documentação as-built, verificação dos circuitos de corrente e análise de registros de eventos constitui uma camada adicional de validação para a função 87T. As conclusões são limitadas ao caso e à configuração analisados.

PALAVRAS-CHAVE: Proteção diferencial de transformadores. ANSI 87T. Interface físico-lógica. Comissionamento sistêmico. IED.

ABSTRACT

The reliability of transformer differential protection depends on consistency among the protection philosophy, Intelligent Electronic Device (IED) settings, current circuits, and physical installation. This qualitative technical case study examines the risks associated with inconsistencies at the physical–logical interface of ANSI 87T protection. Factory Acceptance Test (FAT) and Site Acceptance Test (SAT) records, secondary-injection tests, design documentation, and transformer energization oscillography were analyzed. The method was reorganized into a reproducible seven-step protocol with traceability criteria linking documentation, settings, physical circuits, vector balance, fault response, and transient behavior.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara (UNIARA), atuante em projetos e comissionamento de SPCS.
[2] Mestre e Docente do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara (UNIARA).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Single-phase tests produced operating times from 0.030 s to 0.033 s, while the field event showed an inrush condition with high harmonic distortion and waveform-blocking logic activity.The results indicate that isolated logical validation is insufficient to demonstrate physical–logical interface integrity because polarity, phase sequence, transformation ratio, or wiring errors may remain outside the scope of individualized tests. The study concludes that integrating FAT, SAT, as-built documentation, current-circuit verification, and event-record analysis provides an additional validation layer for 87T protection. Conclusions are limited to the case study and analyzed configuration.

KEYWORDS: *Transformer differential protection. ANSI 87T. Physical–logical interface. Systemic commissioning. IED.*

RESUMEN
La confiabilidad de la protección diferencial de transformadores depende de la coherencia entre la filosofía de protección, la parametrización del Dispositivo Electrónico Inteligente (IED), los circuitos de corriente y la instalación física. Este estudio de caso técnico, de naturaleza cualitativa, analiza los riesgos asociados a inconsistencias en la interfaz físico-lógica de la función ANSI 87T. Se examinaron registros de Pruebas de Aceptación en Fábrica y en Campo, ensayos de inyección secundaria, documentación de diseño y oscilografías de energización. El método fue reorganizado en un protocolo reproducible de siete etapas, con criterios de trazabilidad entre documentación, parametrización, circuitos físicos, equilibrio vectorial, respuesta ante fallas y comportamiento transitorio. Los ensayos monofásicos registraron tiempos de actuación entre 0,030 s y 0,033 s, mientras que el evento de campo evidenció una condición de inrush con elevada distorsión armónica y actuación de la lógica de bloqueo por forma de onda. Se concluye que la validación lógica aislada no demuestra por sí sola la integridad de la interfaz físico-lógica.

PALABRAS CLAVE: *Protección diferencial de transformadores. ANSI 87T. Interfaz físico-lógica. Puesta en servicio sistémica. IED.*

INTRODUÇÃO

A modernização dos Sistemas de Proteção, Controle e Supervisão (SPCS) ampliou a capacidade de processamento, registro de eventos e integração dos sistemas de proteção. Essa evolução, entretanto, não elimina o risco associado à engenharia de aplicação. Na proteção diferencial de transformadores, a decisão lógica depende de grandezas analógicas que percorrem uma cadeia física composta por transformadores de corrente (TCs), circuitos secundários, borneiras, cabos, entradas analógicas e parametrização do IED. Uma divergência em qualquer elo pode alterar o somatório vetorial utilizado pelo algoritmo e produzir uma corrente diferencial que não representa uma falta interna.

O problema de pesquisa consiste em determinar em que medida testes funcionais individualizados são suficientes para assegurar a correspondência entre a filosofia de proteção definida no projeto e sua implementação física. O foco foi restrito às inconsistências diretamente relacionadas aos circuitos de corrente e à função diferencial:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

polaridade, faseamento, relação de transformação, compensação, ligações entre borneiras e entradas do IED, além da coerência entre documentação, parametrização e comportamento observado. Intertravamentos e lógicas redundantes não são tratados como objetos experimentais independentes, evitando ampliar artificialmente o escopo.

A hipótese adotada é que a integração sistemática entre TAF, TAC, documentação de projeto, parametrização, inspeção dos circuitos físicos e registros de eventos aumenta a capacidade de revelar divergências que podem permanecer ocultas quando cada camada é verificada isoladamente. O objetivo geral é analisar o impacto dessas inconsistências sobre a confiabilidade da proteção diferencial de transformadores. Como objetivos específicos, pretende-se: caracterizar os principais pontos de divergência na interface físico-lógica; sistematizar um protocolo de validação reproduzível; organizar quantitativamente os resultados dos ensaios disponíveis; e discutir os limites de inferência do estudo de caso.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Proteção diferencial de transformadores e equilíbrio vetorial

A proteção diferencial de transformadores baseia-se na comparação entre correntes medidas nos terminais da zona protegida. Após a compensação das relações de transformação e dos deslocamentos de fase associados ao grupo vetorial, a condição ideal de operação sem falta interna é o equilíbrio vetorial das correntes. A representação conceitual pode ser expressa por $I_{op} \approx \Sigma I_{comp}$, enquanto a corrente de restrição é obtida a partir das correntes que circulam nos terminais, conforme a filosofia implementada pelo fabricante. A Lei das Correntes de Kirchhoff (LKC) oferece a base física para essa interpretação, e sua aplicação aos sistemas de proteção pode ser compreendida a partir dos fundamentos de análise de circuitos e da proteção de sistemas elétricos de potência (ALEXANDER; SADIKU, 2013; CAMINHA, 1977). Na aplicação prática, entretanto, são necessárias compensações adicionais de relação, fase e sequência, conforme a topologia do transformador e a filosofia de proteção adotada (MAMEDE FILHO, 2024).

Em transformadores de potência, o relé diferencial precisa conciliar sensibilidade e segurança. Correntes elevadas podem ocorrer durante faltas internas, mas também em energização, faltas externas com saturação de TC e condições transitórias. Por esse motivo, os relés modernos utilizam características percentuais de restrição e mecanismos complementares de supervisão. A documentação técnica do SEL-487E descreve uma

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

característica de dois estágios de inclinação capaz de adaptar a restrição às condições de corrente e manter a segurança diante de formas de onda fortemente distorcidas ou de saturação dos TCs (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, 2026). Em arquitetura equivalente, a plataforma SIPROTEC 5 dispõe de funções de proteção diferencial de transformadores com recursos de compensação e processamento configurável das grandezas medidas, reforçando a necessidade de coerência entre a aplicação física e a engenharia do IED (SIEMENS AG, 2022).

A correta polaridade dos TCs é decisiva para a estabilidade do esquema. Uma inversão física ou lógica pode transformar um estado que deveria resultar em cancelamento vetorial em um estado de soma. O mesmo ocorre, em diferentes proporções, com troca de fases, relação incorreta, compensação angular inadequada ou divergência entre a borneira executada e o diagrama. A especificação, a aplicação e a verificação dos equipamentos de medição devem, portanto, permanecer coerentes com os critérios de projeto e com a filosofia de proteção da subestação (MAMEDE FILHO, 2013, 2025). Assim, o conceito de interface físico-lógica não se limita à programação do IED: ele representa a continuidade verificável entre o sinal físico e o significado matemático atribuído pelo algoritmo.

1.2. Erros de relação, fase e saturação de TCs

Os TCs introduzem requisitos próprios de exatidão e comportamento transitório. Em regime permanente, erros de relação e de fase podem produzir desequilíbrio residual; em transitórios severos, a saturação pode modificar a forma de onda secundária e comprometer a estabilidade da função diferencial. Esses aspectos devem ser considerados desde a especificação do sistema de medição até a validação da proteção aplicada (MAMEDE FILHO, 2013, 2025). Estudos recentes sobre proteção adaptativa confirmam que a saturação do TC e a sobre-excitação podem produzir condições capazes de confundir esquemas diferenciais convencionais, especialmente quando coexistem com correntes de magnetização (RAICHURA et al., 2021).

A consequência metodológica é relevante: não basta comprovar que o relé opera para uma falta simulada. Também é necessário verificar se a corrente entregue ao IED, após percorrer a cadeia de medição e compensação, mantém o sentido, a magnitude e a relação angular esperados. Essa verificação deve ser rastreável desde o diagrama até a entrada analógica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.3. Corrente de magnetização, harmônicos e segurança da função 87T

A energização de um transformador pode produzir corrente de magnetização de grande magnitude, assimétrica e rica em componentes harmônicas. Tradicionalmente, a segunda harmônica é empregada como um dos critérios para diferenciar *inrush* de falta interna. Contudo, a literatura demonstra que esse conteúdo pode ser reduzido em condições de saturação profunda do núcleo, denominada ultrassaturação, e que a segurança não deve depender exclusivamente de um único limiar harmônico.

Hodder *et al.* (2014) analisaram casos em que a segunda harmônica caiu abaixo de faixas tradicionalmente utilizadas, destacando o conflito entre dependabilidade e segurança. Pesquisas posteriores também registram limitações do bloqueio convencional quando há alta remanência ou perturbações combinadas. Assim, o estudo do evento de campo deste trabalho não é utilizado para afirmar que toda condição de *inrush* apresenta a mesma assinatura, mas para demonstrar a importância de confrontar a forma de onda, o conteúdo harmônico e o estado dos elementos lógicos do IED.

Os dados técnicos disponíveis para o caso analisado mostram que a fase B apresentou componente de segunda harmônica superior ao limiar de 15% e que a lógica de bloqueio cruzado pode ser aplicada pelo relé. A análise de suporte técnico associada ao evento também registrou que os elementos de bloqueio e restrição por harmônicos operam de forma independente e que a atuação observada ocorreu por elemento diferencial restrito em uma fase específica. Esse comportamento reforça a necessidade de registrar não apenas o valor de uma harmônica, mas também o caminho lógico efetivamente utilizado pelo IED.

Além da segunda harmônica, devem ser considerados os mecanismos de bloqueio por forma de onda, restrição percentual, elementos de alta corrente e supervisões específicas. O objetivo não é propor um ajuste universal, mas mostrar que a interpretação de um evento exige a leitura conjunta das correntes, da parametrização e dos sinais digitais.

1.4. IEC 61850 e a ampliação da interface físico-lógica

A digitalização baseada na IEC 61850 desloca parte das interfaces para arquivos de engenharia, mensagens GOOSE, Sampled Values e ferramentas de configuração. A interface físico-lógica passa, portanto, a incluir a consistência entre sinais de processo, modelos de dados, arquivos de configuração e documentação as-built. A IEC 61850-10 estabelece técnicas de ensaio de conformidade voltadas a dispositivos, clientes, Sampled

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Values e ferramentas de engenharia, enquanto a IEC 61850-9-2 consolida requisitos para o transporte de valores amostrados em arquiteturas de automação de sistemas elétricos (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2020, 2025).

Nesse contexto, Process Bus não elimina a necessidade de validação integrada. A cadeia física pode ser parcialmente substituída por uma cadeia digital, mas permanecem riscos de mapeamento incorreto, associação inadequada de sinais, versões divergentes de configuração e inconsistências entre projeto e implementação. O princípio metodológico do presente estudo permanece válido: verificar a rastreabilidade ponta a ponta entre a grandeza esperada, o ponto de aquisição, a configuração e a resposta do sistema.

1.5. Confiabilidade, comissionamento e gestão de configuração

Confiabilidade, neste estudo, é tratada de forma operacional como a capacidade do sistema de proteção de preservar a coerência entre a filosofia prevista e a resposta observada dentro dos limites de sua aplicação. Não se afirma uma taxa probabilística global de confiabilidade, pois o conjunto de dados não contém população estatística suficiente para essa estimativa. O termo é empregado para discutir segurança funcional, seletividade e consistência de implementação.

O comissionamento deve, portanto, ser entendido como processo de verificação por camadas. O TAF avalia o painel e a lógica em ambiente controlado; o TAC verifica a integração após a instalação; e a análise operacional confronta a resposta real com a expectativa de projeto. Nenhuma dessas camadas, isoladamente, substitui as demais. A contribuição metodológica consiste em formalizar os pontos de transição entre elas, nos quais a informação pode deixar de ser rastreável.

Em sistemas digitais, a gestão de configuração é parte da proteção. Arquivos de parametrização, versões de firmware, diagramas revisados, lista de cabos, bornes, arquivos de engenharia e documentação *as-built* precisam apontar para uma mesma configuração efetivamente instalada. A existência de recursos de inversão de polaridade por software, por exemplo, pode resolver uma necessidade de compensação, mas também pode ocultar uma divergência se a documentação física não for atualizada.

Com base nessa discussão, o estudo adota a seguinte premissa: uma aprovação funcional somente pode ser considerada evidência de integridade da interface quando houver correspondência documental e física do caminho completo das grandezas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

utilizadas pela função 87T. Essa premissa orienta a metodologia e a interpretação dos resultados.

1.6. Lacuna identificada e posicionamento do estudo

A literatura técnica é robusta quanto aos algoritmos diferenciais e aos mecanismos de segurança, mas a transição entre projeto, parametrização e instalação costuma ser tratada de forma fragmentada. O estudo posiciona sua contribuição nessa lacuna aplicada: não propõe novo algoritmo diferencial, mas um procedimento de validação que torna explícita a rastreabilidade entre o circuito físico e a lógica que interpreta suas correntes.

Esse posicionamento também delimita a principal contribuição prática. O protocolo proposto não substitui manuais de fabricante, estudos de proteção ou normas de comissionamento; ele organiza evidências já produzidas por essas atividades para que a aprovação de uma etapa possa ser confrontada com a seguinte.

2. METODOLOGIA

2.1. Delineamento, unidade de análise e fontes de evidência

A pesquisa caracteriza-se como estudo de caso técnico, qualitativo, documental e explicativo. Essa classificação decorre da análise aprofundada de uma situação aplicada, com utilização de documentação, registros de ensaio e interpretação técnica contextualizada, em consonância com os fundamentos metodológicos de Lakatos e Marconi (2017). A unidade de análise é a cadeia de implementação da função ANSI 87T em um transformador de potência de 25 MVA, com tensões nominais de 138/34,5 kV, instrumentada por TCs de relações 400/5 A e 800/5 A. Os documentos de ensaio disponíveis indicam relé SEL-487E e equipamentos de injeção secundária OMICRON CMC 256plus e QuickCMC, conforme a etapa de teste analisada.

Foram utilizadas quatro classes de evidência: a) registros de ensaios monofásicos de TAF; b) registros de ensaios de aceitação e injeção harmônica; c) documentação técnica de análise do evento de energização e comunicação de suporte do fabricante; e d) oscilografias e registros gráficos de campo. A seleção das oscilografias não foi aleatória: foram incluídos registros diretamente relacionados à energização do transformador e à análise da estabilidade da proteção diferencial.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Para reduzir ambiguidades, a análise separou dado medido, dado parametrizado e inferência técnica. Valores registrados em relatórios foram tratados como observações do caso; interpretações sobre mecanismos de atuação foram confrontadas com a documentação do relé e com a literatura. Não foram criados resultados experimentais inexistentes. Em especial, a hipótese de inversão deliberada de polaridade é tratada como cenário de não conformidade a ser ensaiado em trabalhos futuros, e não como experimento já executado.

2.2. Caracterização dos parâmetros relevantes

2.2.1. Rastreabilidade dos parâmetros e hierarquia das evidências

Para reforçar a reprodutibilidade, os parâmetros foram classificados conforme a sua origem. Valores diretamente presentes em relatórios de ensaio, registros de evento, oscilografias e documentação de parametrização foram tratados como evidência primária do estudo de caso. Informações obtidas por correlação entre documentos foram utilizadas para verificar coerência de relações, compensações e normalizações. Já mecanismos de engenharia formulados para explicar o comportamento observado foram mantidos no nível de hipótese. Essa hierarquia evita que uma interpretação tecnicamente plausível receba o mesmo peso de uma grandeza efetivamente medida.

Essa distinção foi particularmente necessária no evento de energização. A documentação disponível registra referência de bloqueio por segunda harmônica de 15%, *pickup* diferencial de 0,40 p.u. e inclinações de 13% e 25%, além de estados associados aos mecanismos de segurança da função. Entretanto, não foi disponibilizada uma série temporal completa da componente de segunda harmônica exatamente no instante de cada decisão lógica. Por isso, o estudo não converte THD elevado em percentual de segunda harmônica. O primeiro descreve a distorção global da forma de onda; o segundo corresponde a uma componente específica utilizada por determinada lógica do relé.

A análise técnica preliminar do caso levantou hipóteses relacionadas à composição harmônica, à restrição percentual, à compensação vetorial e à eventual influência dos canais de medição. Tais hipóteses são compatíveis com a literatura sobre *inrush* de baixo conteúdo harmônico e saturação de TCs, mas não foram apresentadas como causas comprovadas. Para confirmá-las seriam necessários, entre outros registros, Iop, Irest, componentes harmônicas temporais e a sequência completa de estados digitais. A metodologia foi, portanto, ampliada sem aumentar artificialmente a força probatória dos documentos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Os registros analisados informam corrente de referência aproximada de 1,31 A para o terminal de 138 kV e 2,61 A para o terminal de 34,5 kV, coerentes com a potência nominal e as RTCs indicadas. A documentação de análise do evento registra, para a função diferencial, *pickup* de 0,40 p.u., inclinações de 13% e 25% e referência de bloqueio/restrição por segunda harmônica em 15%. Esses parâmetros foram utilizados apenas como caracterização do caso, sem pretensão de recomendar ajustes universais.

Os critérios de aprovação adotados foram: correspondência entre corrente aplicada e corrente reconhecida; coerência de módulo e ângulo com a compensação esperada; ausência de atuação em condição de equilíbrio; atuação da função quando submetida ao cenário interno de ensaio; coerência entre elementos digitais e condição transitória; e rastreabilidade documental entre projeto, parametrização e instalação.

2.3. Protocolo sistêmico de validação físico-lógica

Para atender ao requisito de reprodutibilidade, o procedimento foi organizado em sete etapas sequenciais. A execução de uma etapa não elimina a necessidade da seguinte; o resultado de cada fase deve permanecer associado ao documento, arquivo ou registro que permite sua auditoria.

Quadro 1. Protocolo sistêmico de validação da interface físico-lógica

Etapa	Verificação	Evidência	Critério de aprovação
1	Base documental	Unifilar, trifilar, funcional, as-built	Mesma identificação de sinais, fases e polaridades
2	Parametrização	Arquivo/relatório de settings	RTC, TAP, compensação e funções coerentes
3	Inspeção física	Bornes, cabos e circuitos	Ligação conforme documentação aprovada
4	Equilíbrio vetorial	Teste de carga/injeção equilibrada	Iop residual dentro do critério do projeto
5	Resposta a falta	Injeção secundária controlada	Atuação seletiva e registro coerente

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

6	Transitórios	COMTRADE/oscilografia e estados digitais	Bloqueios e restrições compatíveis com o evento
7	Consolidação	Matriz de rastreabilidade	Nenhuma divergência crítica pendente

Fonte: Elaboração própria com base nos documentos do estudo.

A etapa 1 estabelece a referência documental; a etapa 2 verifica se o IED interpreta o sistema conforme a filosofia; a etapa 3 confirma a materialização física; as etapas 4 e 5 avaliam estabilidade e dependabilidade; a etapa 6 acrescenta o comportamento em condição transitória; e a etapa 7 registra a decisão de conformidade. O protocolo é reproduzível porque cada etapa possui objeto, evidência e critério de encerramento.

Quando a documentação do empreendimento exigir critérios adicionais, como tolerâncias específicas de tempo, relação de TC ou procedimentos corporativos, esses valores devem ser incorporados ao registro da etapa correspondente. Neste artigo, não se atribui genericamente o protocolo a uma diretriz pública específica da concessionária, pois os documentos disponibilizados para o estudo não permitem rastrear uma única norma corporativa para todos os critérios.

2.4. Tratamento dos dados e limitações metodológicas

Os tempos de atuação foram extraídos dos relatórios de ensaio. As grandezas harmônicas e os estados lógicos foram obtidos dos registros disponíveis de oscilografia e análise de evento. Quando uma variável não estava explicitamente registrada, ela não foi convertida em valor medido. Por exemplo, a elevada Distorção Harmônica Total (THD) não foi utilizada como substituto numérico da segunda harmônica; as duas grandezas foram mantidas conceitualmente distintas.

A comparação entre projeto, parametrização e montagem foi conduzida por rastreabilidade: identificação do terminal de medição, relação do TC, fase, polaridade, compensação e sinal reconhecido pelo IED. Para cada divergência potencial, o protocolo exige localizar o ponto em que o significado do sinal muda. Essa abordagem evita concluir apenas pelo resultado final de *trip*.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Como não foi executado, nos documentos disponibilizados, um ensaio controlado com inversão física deliberada de polaridade, troca de fase ou erro de ligação, não se apresenta tal cenário como resultado empírico. O artigo formaliza o procedimento de detecção, mas preserva a limitação probatória: a eficácia do protocolo para uma não conformidade deliberadamente inserida deve ser validada experimentalmente em investigação complementar.

Outra limitação decorre do desenho de estudo de caso. A configuração do transformador, as relações de TC, os ajustes e o comportamento do firmware não representam todos os IEDs ou topologias. As conclusões são analíticas e aplicadas ao caso; generalizações dependem de repetição em outros equipamentos, grupos vetoriais, arquiteturas e condições de sistema.

2.5. Sequência operacional reproduzível

Antes da energização, recomenda-se executar a sequência: congelar a versão documental; registrar a versão do arquivo de *settings*; conferir borne a borne os circuitos críticos; aplicar teste de equilíbrio com correntes compensadas; realizar ensaio de atuação com cenário interno; testar as lógicas de bloqueio e restrição previstas; revisar os registros; e, após a energização, comparar a oscilografia com o comportamento esperado. Uma divergência em qualquer etapa deve retornar o processo ao ponto de origem e atualizar a documentação *as-built*.

A sequência não substitui testes de proteção exigidos pelo fabricante. Sua função é integrar os resultados, impedindo que uma aprovação isolada seja interpretada como aprovação automática de toda a cadeia físico-lógica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Validação preliminar e resposta da função diferencial

Os ensaios monofásicos disponíveis demonstraram resposta rápida do sistema em condições de falta simulada. Os registros indicam aproximadamente 0,030 s para a fase A, 0,030 s para a fase B e 0,033 s para a fase C. A diferença máxima entre os três resultados foi de 0,003 s, o que evidencia comportamento temporal semelhante dentro do conjunto de ensaios apresentado.

Cabe distinguir esses valores de uma temporização genérica de 1 s, comparação que poderia induzir interpretação incorreta. Os tempos de 30 a 33 ms correspondem à resposta observada no ensaio do caminho de atuação da função diferencial e não devem

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ser entendidos como uma comparação direta com uma temporização universal da função 87T. Caso exista uma temporização de 1 s em outro elemento ou lógica do esquema, ela precisa ser identificada nominalmente no arquivo de *settings* antes de servir como critério de comparação.

Por essa razão, o critério de análise foi reformulado para verificar coerência e repetibilidade relativa entre as fases, e não apenas inferioridade a um número de referência. Os resultados confirmam que, para os três cenários monofásicos apresentados, houve operação e sinalização de disparo dentro de dezenas de milissegundos.

Figura 1. Registro de ensaio monofásico de atuação da proteção diferencial

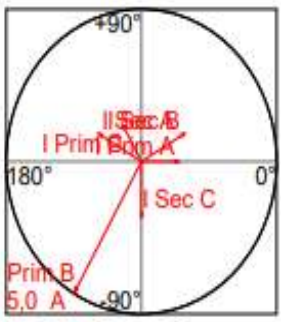
Título: Teste Atuação fase IB AT

Calculadora de Falta:

Modoentrada Tabela	Parâmetros (Todos valores são secundários)
Direto	

Ajustes do gerador

I Prim A	1,390A	0,00°
I Prim B	5,000A	-120,00°
I Prim C	1,390A	120,00°
I Sec A	1,850A	150,00°
I Sec B	1,850A	30,00°
I Sec C	1,850A	270,00°



Entradas Binárias

Nome	Inclinação	Tempo
Disparo	0->1	0,030s
Início	1->0	n/d
Sobrecarga	1->0	n/d

Fonte: Relatório de ensaio disponibilizado para o estudo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A Figura 1 representa um dos registros utilizados na validação da resposta. Os ensaios individuais são relevantes para comprovar que o IED responde às correntes aplicadas. Entretanto, por sua própria natureza, não comprovam automaticamente que a mesma relação de sinais será preservada após a passagem pelos TCs, cabos, borneiras e interfaces instaladas em campo.

3.2. Organização quantitativa dos ensaios

Tabela 1. Síntese quantitativa dos cenários de ensaio e registros analisados

Cenário	Fase	Tempo observado	Resultado	Interpretação
Injeção monofásica	IA	0,030 s	Atuação	Resposta rápida e coerente
Injeção monofásica	IB	0,030 s	Atuação	Resposta rápida e coerente
Injeção monofásica	IC	0,033 s	Atuação	Resposta rápida e coerente
Energização de campo	Trifásico	Evento transitório	Bloqueios ativos	Inrush e supervisão harmônica/forma de onda
Teste harmônico	2ª harmônica	15% nominal BT	Bloqueio avaliado	Validação de critério harmônico
Teste harmônico	5ª harmônica	35% nominal BT	Bloqueio avaliado	Validação de supervisão correspondente

Fonte: Elaboração própria com base nos relatórios de ensaio e registros do estudo.

A Tabela 1 reduz o caráter exclusivamente narrativo da seção de resultados e permite separar o que foi efetivamente testado do que foi observado em campo. Os três ensaios monofásicos demonstram dependabilidade da função para os cenários aplicados. Os testes harmônicos, por sua vez, mostram que o ambiente de ensaio foi utilizado para avaliar critérios associados à estabilidade. A energização real acrescenta evidência de comportamento transitório que não é reproduzido integralmente pela injeção senoidal simples.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A configuração do transformador de 25 MVA, 138/34,5 kV, com RTCs de 400/5 A e 800/5 A, fornece referência para a normalização das correntes. A análise documental calculada para o caso indica aproximadamente 1,31 A no lado de 138 kV e 2,61 A no lado de 34,5 kV como valores de referência secundária associados à potência nominal, coerentes com os registros apresentados.

Esses resultados devem ser lidos como evidência de funcionamento do conjunto de teste, não como prova estatística de confiabilidade global. O número de cenários é limitado e não há série repetitiva suficiente para cálculo de dispersão ou intervalo de confiança.

3.3. Análise do evento de energização e da lógica de segurança

A oscilografia de campo analisada registra a energização do transformador e apresenta formas de onda assimétricas e fortemente distorcidas, compatíveis com corrente de magnetização. Os registros disponibilizados indicam amplitudes elevadas e THD expressivo em diferentes canais. A análise harmônica de suporte registrou, para determinados canais, valores superiores a 100% e, em um dos canais, superiores a 500% de THD. Esses números caracterizam a severidade da distorção, mas não permitem, por si sós, determinar o percentual instantâneo da segunda harmônica no momento exato do *pickup*.

Na documentação do evento, os sinais de bloqueio por forma de onda 87WBA, 87WBB e 87WBC foram registrados como ativos. A comunicação técnica de suporte associada ao caso também informa que a detecção harmônica tradicional e a lógica de restrição podem seguir caminhos independentes, motivo pelo qual a análise deve identificar qual elemento efetivamente contribuiu para a decisão de *trip* ou bloqueio.

A importância desse resultado está na diferença entre “fenômeno elétrico detectado” e “atuação evitada”. Um registro pode mostrar que o relé reconheceu características de *inrush* e, ainda assim, exigir análise da coordenação entre os elementos diferenciais, bloqueios e restrições. Essa distinção melhora a precisão da discussão e evita concluir que a presença de THD elevado, isoladamente, comprova o sucesso de um critério específico.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Registro de oscilografia e análise espectral durante evento de energização



Fonte: Oscilografia registrada em campo e documentação técnica do estudo.

3.4. Confronto entre parâmetros, medições e interpretação

3.4.1. Análise integrada do evento e limites de causalidade

A leitura conjunta dos documentos permite detalhar a interação entre os parâmetros registrados e o comportamento transitório sem atribuir causalidade exclusiva a um único ajuste. O caso foi caracterizado por bloqueio de segunda harmônica com referência de 15%, *pickup* diferencial de 0,40 p.u. e duas regiões de inclinação, de 13% e 25%. Esses elementos mostram que a estabilidade não depende apenas de um limiar harmônico, mas da interação entre a característica diferencial, os mecanismos de bloqueio ou restrição e a condição efetivamente apresentada às entradas de medição.

Esse resultado dialoga com Hodder *et al.* (2014), que demonstraram condições de energização com baixo conteúdo de segunda harmônica, e com Mo *et al.* (2022), que desenvolveram critérios alternativos diante das limitações do método harmônico tradicional. Stipetic, Filipovic-Grcic e Perkovic (2023) também demonstraram, por meio de simulações paramétricas, que as condições de energização influenciam de forma significativa o comportamento transitório e a probabilidade de operação indevida. Portanto, a elevada distorção registrada no caso é compatível com um evento de magnetização severa, mas não permite, isoladamente, determinar qual mecanismo específico prevaleceu na decisão lógica.

A documentação técnica preliminar sugeriu possibilidades adicionais, como influência da composição harmônica no instante crítico, saturação assimétrica de canais de medição ou compensação inadequada de fase e amplitude. O estudo preserva essas possibilidades como hipóteses de engenharia. A diferença é metodologicamente

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

importante: uma hipótese pode orientar a investigação e o próximo ensaio, mas não deve ser convertida em resultado experimental sem o respectivo registro. Essa postura assegura a separação entre medição, interpretação e limite de inferência.

A consequência prática é que relatórios de eventos relevantes devem consolidar, sempre que disponíveis, as formas de onda, Iop, Irest, fasores calculados, componentes harmônicas empregadas pela lógica, estados digitais e comando final. Katoulaei *et al.* (2024), em um ambiente de proteção diferencial baseado em IEC 61850, adotaram uma estrutura de validação que registra correntes, grandezas de operação e restrição e sinais de *trip*, permitindo confrontar a característica teórica com o comportamento efetivamente obtido. Para o presente protocolo, a mesma lógica de rastreabilidade pode ser aplicada tanto a cadeias analógicas convencionais quanto a arquiteturas digitais.

Tabela 2. Separação entre dado registrado, interpretação técnica e limite de inferência

Variável	Evidência disponível	Interpretação permitida	Limite da inferência
PCT2	15%	Limiar documentado para o caso	Não substitui a série temporal da harmônica
Correntes	Formas assimétricas e distorcidas	Compatíveis com inrush	Pico não identifica sozinho a causa
THD	Valores elevados em múltiplos canais	Confirma distorção intensa	Não é igual ao percentual de 2ª harmônica
87WBA/B/C	Estados ativos	Indica atuação da lógica de forma de onda	Exige verificar o caminho final de trip
87R	Atuação registrada em análise de suporte	Elemento restrito participou do evento	Depende da configuração e da janela temporal
RTC/TAP	400/5 e 800/5; referências 1,31 e 2,61 A	Coerência de normalização do caso	Não válida por si a polaridade física

Fonte: Elaboração própria com base na documentação do evento.

A Tabela 2 formaliza a distinção entre medição e interpretação. O caso sustenta que a energização produziu uma condição transitória severa e que mecanismos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

específicos de supervisão foram registrados. Não sustenta, sem o arquivo completo e os valores temporais de Iop e Irest, a atribuição exclusiva da causa a um único ajuste.

A literatura sobre baixo conteúdo de segunda harmônica reforça essa cautela. Condições de saturação profunda podem reduzir a assinatura harmônica tradicional, e estudos recentes propõem critérios adicionais para diferenciar *inrush*, saturação de TC e faltas contaminadas por transitórios. Para o presente estudo, a consequência prática é metodológica: a análise de um evento deve preservar os registros brutos e relacioná-los aos estados digitais e à parametrização.

3.5. Interface físico-lógica: o que os resultados demonstram

O conjunto de evidências demonstra diretamente três pontos. Primeiro, a função diferencial respondeu aos cenários de falta monofásica aplicados em bancada. Segundo, o sistema apresentou mecanismos de segurança diante de condição real de energização. Terceiro, os resultados dessas duas classes de teste não são equivalentes: a aprovação de uma não comprova automaticamente a integridade da outra.

É nesse intervalo que se localiza a interface físico-lógica. O IED pode estar corretamente parametrizado e ainda receber uma corrente invertida por erro físico. Da mesma forma, uma ligação física pode estar correta e ser interpretada de modo inadequado por compensação, relação ou configuração. A função diferencial opera sobre o sinal efetivamente recebido; portanto, a validação deve comprovar tanto a origem física quanto o significado lógico do sinal.

O estudo não afirma ter produzido experimentalmente uma inversão física deliberada. A evidência experimental disponível mostra a vulnerabilidade metodológica e permite definir o teste de não conformidade como extensão necessária. Para completar a demonstração causal em futuros trabalhos, o protocolo recomenda registrar uma condição de referência conforme, introduzir uma única alteração controlada — polaridade, troca de fase ou ligação —, medir Iop e Irest, verificar a resposta do IED e repetir o ensaio após a correção. Esse desenho antes/depois forneceria a prova experimental direta ainda ausente.

A ausência desse ensaio deliberado é reconhecida como limitação. Ainda assim, o resultado principal do estudo permanece válido no nível demonstrado: a integração entre documentos, parametrização, ensaios e registros de campo é necessária para avaliar a cadeia completa, porque cada conjunto de evidências responde a uma pergunta diferente.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quadro 2. Cadeia de rastreabilidade da validação físico-lógica

Projeto	Settings	Circuito	Equilíbrio	Falta	Transitório	As-built

Fonte: Elaboração própria.

3.6. Discussão com a literatura e implicações de engenharia

3.6.1. Ampliação do diálogo com a literatura recente

A literatura recente reforça que o problema da confiabilidade da proteção diferencial possui duas camadas: a robustez do algoritmo e a integridade da cadeia de dados que alimenta esse algoritmo. Raichura *et al.* (2021) e Azzouz *et al.* (2023) discutem, sob diferentes abordagens, os efeitos de saturação de TC e condições transitórias sobre a discriminação entre eventos. Afsharisefat, Jannati e Shams (2023) investigaram técnicas avançadas de classificação para distinguir *inrush* e faltas internas, enquanto os estudos de Hodder *et al.* (2014), Mo *et al.* (2022) e Stipetic, Filipovic-Grcic e Perkovic (2023) mostram que não existe um indicador único capaz de representar todos os cenários transitórios. A contribuição do presente artigo não é substituir esses algoritmos, mas assegurar que a grandeza entregue a eles permaneça coerente com o projeto, a parametrização e a instalação.

A mesma necessidade aparece na evolução para subestações digitais. O IEEE PES TR-84 destaca a integração entre documentação, conexão de teste, verificação de GOOSE e *Sampled Values* e validação de desempenho como componentes complementares da aceitação de sistemas IEC 61850 (IEEE POWER & ENERGY SOCIETY, 2020). Katoulaei *et al.* (2024) acrescentam que qualidade do dado, sincronismo e disponibilidade dos fluxos podem interferir diretamente na função diferencial. Assim, a interface físico-lógica discutida neste estudo pode ser entendida como um conceito de rastreabilidade: em sistemas convencionais, acompanha cabos, bornes, TCs e entradas analógicas; em sistemas digitais, acompanha também a identidade, qualidade, sincronismo e associação dos dados. Em ambos os casos, a validação de uma única camada não substitui a verificação ponta a ponta.

A literatura confirma que a segurança da proteção diferencial é desafiada por fenômenos que alteram a forma de onda sem representar falta interna. Raichura *et al.* (2021) analisaram a interação entre *inrush*, saturação de TC e sobre-excitação; Mo *et al.* (2022) discutiram limitações da identificação baseada exclusivamente na segunda harmônica. Hodder *et al.* (2014) mostraram que o baixo conteúdo de segunda harmônica

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

pode ocorrer em condições de ultrassaturação. Em conjunto, esses trabalhos sustentam a interpretação de que nenhum indicador isolado deve substituir a análise contextual do evento.

Para a engenharia de comissionamento, isso significa que o teste deve ser estruturado por função e por interface. Testes de *pickup*, temporização e harmônicos validam aspectos internos do algoritmo. Testes de carga, injeção pelas cadeias físicas, verificação de borneiras e conferência de polaridade avaliam a continuidade do sinal. A análise de oscilografias COMTRADE acrescenta a camada de comportamento real. A contribuição do protocolo é reunir essas verificações em uma sequência auditável.

Há também implicações para a IEC 61850. Em arquiteturas com *Process Bus* e *Sampled Values*, a interface físico-lógica deixa de ser exclusivamente cobre-para-bornes e passa a incluir mapeamentos de dados e arquivos de engenharia. A verificação ponta a ponta deve, portanto, incluir associação de canais, sincronismo, identificação de *streams*, versões de configuração e coerência com o modelo de proteção, observando também os princípios de transporte de valores amostrados e de ensaio de conformidade aplicáveis à arquitetura (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2020, 2025). O mesmo raciocínio de rastreabilidade pode ser aplicado a esses ambientes.

Outro ponto crítico é a gestão de configuração. Alterações de software, inversões lógicas, ajustes temporários de comissionamento e revisões de projeto devem produzir atualização controlada da documentação. Caso contrário, o sistema pode permanecer funcional em ensaios rotineiros, mas sua descrição técnica deixa de representar a realidade. Esse descolamento reduz a capacidade de diagnóstico e aumenta o risco de intervenção futura baseada em informação incorreta.

3.7. Proposta de matriz de aceitação para o ciclo de comissionamento

Tabela 3. Matriz de aceitação para integração entre projeto, parametrização e instalação

Camada	Pergunta de validação	Evidência mínima	Ação se reprovado
Projeto	O sinal previsto é inequívoco?	Diagrama revisado e lista de sinais	Corrigir engenharia
Configuração	O IED interpreta o sinal previsto?	Settings e relatório de revisão	Corrigir parâmetros

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Montagem	O circuito executado corresponde ao projeto?	Inspeção e continuidade	Corrigir ligação
Estabilidade	Iop permanece compatível em equilíbrio?	Teste de carga/fasores	Revisar compensação
Dependabilidade	A função opera no cenário interno?	Relatório de injeção	Revisar lógica/ajuste
Segurança transitória	Bloqueios atuam coerentemente?	COMTRADE e estados digitais	Revisar filosofia
Documentação final	A realidade está registrada?	As-Built e versão final	Atualizar base

Fonte: Elaboração própria.A matriz não estabelece tolerâncias universais. Os valores quantitativos devem ser definidos pelo estudo de proteção, fabricante, classe de exatidão, filosofia do empreendimento e procedimento aplicável. O ganho está em impedir que uma evidência de uma camada seja usada para responder indevidamente por outra.

Como recomendação prática, o registro final de comissionamento deve incluir identificador do projeto, revisão do diagrama, versão do arquivo de *settings*, versão de firmware quando relevante, instrumento de teste, data, cenário, grandezas aplicadas, estados digitais observados e conclusão. Para eventos de energização ou perturbações relevantes, o arquivo COMTRADE e a análise do evento devem ser vinculados ao mesmo histórico.

A matriz também pode orientar ensaios *end-to-end*. Quando possível, a corrente deve ser aplicada de forma que percorra o maior trecho possível da cadeia real, e o resultado deve ser confrontado com a atuação final. Em arquiteturas digitais, o princípio equivalente é acompanhar o sinal desde a origem do valor amostrado até a decisão de proteção.

3.8. Síntese das evidências e dos pontos ainda não demonstrados

A análise realizada permite distinguir com maior precisão o que foi demonstrado, o que foi interpretado e o que permanece pendente. Foram diretamente sustentados pelos registros a resposta dos ensaios documentados, a existência dos parâmetros de configuração utilizados no caso e a ocorrência de um evento de energização com elevada distorção e atuação de mecanismos de segurança. A integração entre essas evidências sustenta, em nível metodológico, a insuficiência de uma validação exclusivamente lógica para representar toda a cadeia físico-lógica. Permanecem pendentes a demonstração

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

experimental controlada de uma inversão física deliberada e a atribuição causal exclusiva de um único mecanismo ao comportamento transitório. Essa delimitação preserva o rigor exigido pela análise crítica sem introduzir dados inexistentes.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo analisou a influência da interface físico-lógica sobre a confiabilidade operacional da proteção diferencial de transformadores, com foco na função ANSI 87T. A principal contribuição não foi propor novo algoritmo de proteção, mas estruturar uma forma reproduzível de verificar se a filosofia de proteção mantém coerência ao atravessar as etapas de projeto, parametrização, montagem, ensaio e operação.

Os resultados disponíveis demonstraram que os ensaios monofásicos apresentaram tempos de atuação entre 0,030 s e 0,033 s, evidenciando resposta consistente do conjunto para os cenários internos aplicados. A análise de campo, por sua vez, registrou condição de energização com elevada distorção e atuação de lógicas associadas à segurança da função diferencial. Esses dois grupos de evidências reforçam que comportamento em bancada e comportamento transitório real devem ser tratados como informações complementares.

Foi formalizado um protocolo de sete etapas com critérios de evidência e aprovação, respondendo à necessidade de tornar explícita a metodologia adotada. A aplicação proposta integra documentação, parametrização, inspeção física, equilíbrio vetorial, resposta a faltas, análise de transitórios e consolidação *as-built*. A principal implicação é que a aprovação lógica isolada não deve ser utilizada como evidência suficiente da integridade da cadeia completa.

Também foi delimitado o que não foi demonstrado. Os documentos analisados não contêm ensaio controlado de inversão física deliberada de polaridade, troca de fase ou erro de ligação; portanto, o artigo não apresenta essa condição como resultado experimental. Essa é a principal limitação probatória do estudo. A conclusão sobre o risco de inconsistências baseia-se na estrutura da função diferencial, na rastreabilidade da cadeia de sinais, na documentação técnica e na necessidade de confrontar evidências de diferentes etapas.

As conclusões não autorizam generalização para todos os IEDs, grupos vetoriais ou topologias. O desempenho depende dos ajustes, arquitetura, TCs, procedimento de ensaio e recursos do equipamento. Trabalhos futuros devem executar o experimento

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

controlado antes/depois com uma única não conformidade introduzida, repetir o protocolo em diferentes relés e transformadores, comparar resultados com Iop/Irest e incorporar arquiteturas IEC 61850 com *Process Bus* e *Sampled Values*. Também é recomendável avaliar testes *end-to-end* e métodos automatizados de gestão de configuração entre arquivos de engenharia e documentação *as-built*.

Em síntese, a confiabilidade da proteção diferencial não deve ser atribuída apenas ao desempenho do relé. Ela depende da coerência verificável entre o sistema físico que produz a corrente e a lógica que atribui significado a essa corrente. A integração estruturada entre TAF, TAC, inspeção dos circuitos e análise operacional constitui, no âmbito do caso estudado, uma camada adicional de validação capaz de reduzir incertezas antes e após a energização.

REFERÊNCIAS

AFSHARISEFAT, R.; JANNATI, M.; SHAMS, M. Discrimination of inrush current and internal faults incorporating the MRA and BIGRU techniques in power transformers. Electric Power Systems Research, v. 219, 109255, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877962300144X?via%3Dihub>. Acesso em: 28 ago. 2026.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. Fundamentos de circuitos elétricos. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

AZZOUZ, M. A. et al. A new inrush current detection for collector transformers' differential protection in DFIG-based wind farms. Electric Power Systems Research, v. 225, 109766, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779623006557?via%3Dihub>. Acesso em: 28 ago. 2026.

CAMINHA, A. C. Introdução à proteção dos sistemas elétricos. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

HODDER, S. et al. Low second-harmonic content in transformer inrush currents: analysis and practical solutions for protection security. In: ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS, 67., 2014, College Station. Proceedings [...]. College Station: IEEE, 2014. p. 1-15. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6799037>. Acesso em: 27 ago. 2026.

IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. Application testing of IEC 61850 based systems. Technical Report TR-84. Piscataway: IEEE, 2020. Disponível em: <https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/technical-reports/pes_tp_tr84_psrc_120720>. Acesso em: 28 ago. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61850-10:2012+AMD1:2025 CSV: Communication networks and systems for power utility automation – Part 10: Conformance testing. Geneva: IEC, 2025. Disponível em:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

https://cdn.standards.iteh.ai/samples/iec/iec-61850-10-2012-amd1-2025/8d277fb9c1b940ea954e4c37706ea5ce/iec-61850-10-2012-amd1-2025.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61850-9-2:2011+A1:2020: Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3. Geneva: IEC, 2020. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/23452/baf1f49507d64dd4960ef151d66ebe00/IEC-61850-9-2-2011-AMD1-2020.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2026.

KATOULAEI, M. K.; RAHMANI, A.; HØIDALEN, H. K.; OLEINIKOVA, I.; MORK, B. Backup subscription scheme for differential protection using IEC 61850-9-2 sampled values. Energy Informatics, v. 7, art. 110, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s42162-024-00409-0>. Acesso em: 28 ago. 2026.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. Fundamentos de metodologia científica. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MAMEDE FILHO, J. Manual de equipamentos elétricos. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MAMEDE FILHO, J. Proteção de sistemas elétricos de potência. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2024.

MAMEDE FILHO, J. Subestações de alta tensão. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2025.

MO, C. et al. Equivalent statistics based inrush identification method for differential protection of power transformer. Electric Power Systems Research, v. 203, 107664, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779621006453?via%3Dihub>. Acesso em: 27 ago. 2026.

RAICHURA, M. et al. Development of an adaptive differential protection scheme for transformer during current transformer saturation and over-fluxing condition. International Transactions on Electrical Energy Systems, v. 31, n. 11, e12751, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2050-7038.12751>. Acesso em: 27 ago. 2026.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. SEL-487E Transformer Protection Relay: instruction manual and product guide. Pullman, WA: SEL, 2026. Disponível em: <https://selinc.com/api/download/116360/>. Acesso em: 27 ago. 2026.

SIEMENS AG. SIPROTEC 5 Transformer Differential Protection 7UT85, 7UT86, 7UT87: manual. V10.00. Munich: Siemens, 2022. Disponível em: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109742323/>. Acesso em: 27 ago. 2026.

STIPETIC, N.; FILIPOVIC-GRCIC, B.; PERKOVIC, M. Impact of autotransformer inrush currents on differential protection operation. Electric Power Systems Research, v. 222, 109309, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779623001980?via%3Dihub>. Acesso em: 28 ago. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.