ISSN: 2675-7222

SAS
South American Sciences

DETECÇÃO DE FALHAS POR INVERSÃO DE POLARIDADE EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE APLICADOS A SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UM ESTUDO DE CASO

POLARITY REVERSAL FAULT DETECTION IN CURRENT TRANSFORMERS APPLIED TOELECTRICAL ENERGY METERING SYSTEMS: A CASE STUDY

https://doi.org/10.63330/sasciencesv6n2-330

Submetido em: 13/10/2026 e Publicado em: 24/11/2026

SAS: e26560

Daniel dos Santos Pontes
Formando em Engenharia Elétrica
Centro Universitário FAMETRO
E-mail: niielpontes@hotmail.com

Layse Oliveira Batista
Mestranda em Clima e Ambiente (INPA/UEA), orientadora do presente trabalho
Centro Universitário FAMETRO
E-mail: layse.batista@fametro.edu.br

Richard Robert de Oliveira Moura
Graduado em Engenharia Elétrica, coorientador do presente trabalho pelo
Centro Universitário FAMETRO
E-mail: richard_robert10@hotmail.com

Resumo

Os transformadores de corrente (TCs) são essenciais aos sistemas de medição de energia elétrica, pois possibilitam a reprodução proporcional de correntes elevadas em níveis adequados aos instrumentos de medição. Entretanto, falhas de instalação, especialmente relacionadas à inversão de polaridade, podem alterar o sentido da corrente, a representação fasorial e os valores de potência registrados, comprometendo a confiabilidade das informações. Objetivo: Analisar os efeitos da inversão de polaridade nos circuitos primário e secundário de TCs em um sistema trifásico de medição de energia elétrica integrado à telemetria, identificando os impactos sobre as grandezas elétricas e a relação de transformação de corrente (RTC). Metodologia: Trata-se de pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa, caráter descritivo e analítico, desenvolvida mediante estudo de caso. Foram analisadas as conexões dos TCs das fases A, B e C, as correntes primárias e secundárias, a RTC, os registros de potência e as condições identificadas antes e após a correção das ligações. Resultados: A análise evidenciou inversão de polaridade nos terminais primários P1 e P2 dos TCs das três fases, associada ao registro de potência ativa negativa. Na fase C, identificou-se adicionalmente uma ligação inadequada no circuito secundário, com caminho paralelo envolvendo o terminal S1, ocasionando redução expressiva da corrente medida e alteração significativa da RTC. Após a

correção das conexões, verificou-se a normalização das correntes secundárias, da RTC e dos registros do sistema de medição. Considerações finais: Os resultados demonstram que a análise conjunta da polaridade, das correntes, da RTC, da representação fasorial e dos dados de telemetria constitui estratégia relevante para o diagnóstico de falhas em sistemas de medição com TCs. O estudo também evidencia a importância de procedimentos sistemáticos de inspeção e da adoção de checklist técnico para prevenir erros de instalação e ampliar a confiabilidade das medições de energia elétrica.

Palavras-chave: Inversão de polaridade; Medição de energia elétrica; Relação de transformação de corrente; Telemetria; Transformador de corrente.

Abstract

Current transformers (CTs) are essential components of electrical energy metering systems because they enable high currents to be proportionally reproduced at levels suitable for measuring instruments. However, installation failures, particularly those related to polarity reversal, can alter current direction, phasor representation, and recorded power values, thereby compromising the reliability of measurement data. Objective: To analyze the effects of polarity reversal in the primary and secondary circuits of CTs in a three-phase electrical energy metering system integrated with telemetry, identifying its impacts on electrical quantities and the current transformation ratio (CTR). Methodology: This is an applied study with a quantitative approach and a descriptive and analytical design, conducted as a case study. The analysis considered the connections of the CTs in phases A, B, and C, primary and secondary currents, CTR, power records, and the conditions identified before and after correction of the connections. Results: The analysis revealed polarity reversal at the P1 and P2 primary terminals of the CTs in all three phases, associated with negative active power readings. In phase C, an improper connection was additionally identified in the secondary circuit, involving a parallel current path at terminal S1, which caused a significant reduction in the measured current and a substantial change in the CTR. After correcting the connections, the secondary currents, CTR, and metering system readings returned to normal conditions. Final considerations: The results demonstrate that the combined analysis of polarity, currents, CTR, phasor representation, and telemetry data is a relevant strategy for diagnosing failures in metering systems using CTs. The study also highlights the importance of systematic inspection procedures and the adoption of a technical checklist to prevent installation errors and improve the reliability of electrical energy measurements.

Keywords: Current transformation ratio; Current transformer; Electrical energy metering; Polarity reversal; Telemetry.

1 INTRODUÇÃO

A confiabilidade da medição de energia elétrica constitui uma questão relevante para a operação segura e eficiente dos sistemas elétricos em diferentes partes do mundo. À medida que redes, indústrias e unidades consumidoras incorporam tecnologias de monitoramento e automação, cresce também a necessidade de assegurar que as grandezas registradas representem adequadamente as condições reais das instalações. Nesse cenário, os transformadores de corrente (TCs) assumem papel estratégico ao permitirem a reprodução proporcional de correntes elevadas em níveis adequados aos instrumentos de medição, proteção e controle, contribuindo para a segurança e a precisão dos sistemas de instrumentação elétrica ABNT 6856, (2021).

No Brasil, a crescente utilização de sistemas digitais de medição e monitoramento reforça a importância da confiabilidade dos dados utilizados para acompanhar o consumo e o comportamento das instalações elétricas. Nesse contexto, falhas aparentemente simples, como conexões inadequadas de transformadores de corrente, podem produzir alterações significativas nas informações registradas. Os erros de relação e de fase constituem parâmetros importantes para avaliar o desempenho desses equipamentos, pois diferenças entre a corrente primária e sua representação secundária podem repercutir na determinação de grandezas utilizadas pelo sistema de medição George et al., (2021). Portanto, compreender essas ocorrências possui relevância técnica, operacional e metrológica.

No estado do Amazonas, essa discussão adquire significado particular diante das características territoriais e operacionais do sistema elétrico e da necessidade de acompanhamento confiável das instalações atendidas. A integração da medição com recursos de telemetria amplia as possibilidades de identificação de comportamentos atípicos, mas também exige capacidade técnica para interpretar corretamente os sinais apresentados. Entre as ocorrências que merecem investigação encontra-se a inversão de polaridade dos TCs, capaz de modificar a referência fasorial da corrente. Além disso, condições inadequadas no circuito secundário podem interferir no comportamento do equipamento e nas informações disponibilizadas ao sistema de medição Gan et al., (2024).

Pesquisar esse problema permite avançar de uma percepção superficial da anormalidade para uma compreensão técnica das relações entre instalação, comportamento eletromagnético e dados registrados. Essa mudança de perspectiva é relevante porque um valor inesperado não deve ser interpretado isoladamente, mas relacionado às condições físicas e elétricas existentes no sistema. Estudos sobre o comportamento dos transformadores de corrente demonstram que condições anormais podem comprometer a reprodução da corrente secundária e afetar a qualidade das informações utilizadas pelos equipamentos associados Martínez-Figueroa et al., (2023). Assim, investigar a origem das alterações observadas favorece diagnósticos mais criteriosos e intervenções tecnicamente fundamentadas.

Espera-se, portanto, que a investigação permita compreender como diferentes condições de ligação dos TCs podem se manifestar nas correntes medidas, na relação de transformação, no comportamento fasorial e nos registros de potência disponibilizados pelo sistema. Mais do que identificar uma falha específica, o estudo busca produzir conhecimento aplicável às atividades de inspeção, manutenção e verificação de sistemas de medição, contribuindo para reduzir diagnósticos equivocados e prevenir recorrências. Diante desse cenário, torna-se necessário investigar, em uma ocorrência real, até que ponto a inversão de polaridade nos circuitos dos transformadores de corrente interfere nas grandezas elétricas e na confiabilidade da medição, questão que conduz diretamente ao objetivo geral desta pesquisa.

2 FUNDAMENTOS TÉCNICOS DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE APLICADOS À MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 FUNDAMENTOS DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE

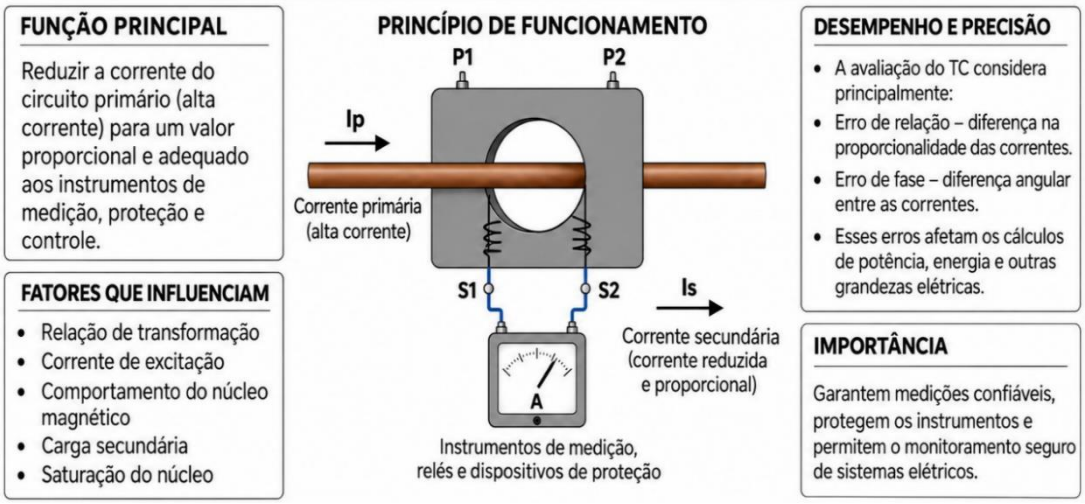
Os transformadores de corrente (TCs) constituem elementos essenciais nos sistemas elétricos de medição, proteção e supervisão, especialmente em instalações nas quais os níveis de corrente inviabilizam a conexão direta dos instrumentos convencionais. Esses equipamentos possibilitam reproduzir, no circuito secundário, uma corrente proporcional àquela que circula no circuito primário, porém em magnitude compatível com medidores, relés e dispositivos de controle. Dessa maneira, estabelecem uma interface entre os circuitos de potência e os sistemas de instrumentação, contribuindo para a segurança operacional e para a obtenção de informações representativas das condições elétricas da instalação Minkner & Schmid, (2022).

Essa função demonstra que a importância dos TCs ultrapassa a simples redução de valores elevados de corrente. Na prática, esses equipamentos participam diretamente da formação das informações utilizadas para interpretar o comportamento de uma instalação elétrica. Uma medição aparentemente precisa pode perder sua confiabilidade quando as condições de instalação ou funcionamento do transformador não correspondem àquelas previstas tecnicamente. Por isso, compreender os fundamentos dos TCs exige considerar o equipamento como parte integrada de um sistema, no qual características construtivas, conexões elétricas, instrumentos associados e condições operacionais precisam funcionar de maneira coerente.

O desempenho dos transformadores de corrente está relacionado a diferentes parâmetros elétricos e eletromagnéticos que influenciam a correspondência entre as grandezas primária e secundária. Entre esses fatores encontram-se a relação de transformação, a corrente de excitação, as características do núcleo magnético, a carga conectada ao secundário e as condições capazes de conduzir o equipamento à saturação. Quando esses elementos permanecem dentro dos limites adequados, espera-se uma reprodução satisfatória

da corrente primária. Entretanto, alterações operacionais podem modificar essa resposta e comprometer a informação disponibilizada aos instrumentos conectados ao circuito secundário (Das, 2020).

Figura 1 - Fundamentos dos Transformadores de Corrente.



Fonte: Próprio autor, (2026).

A figura 1 apresenta, de forma sintetizada, os principais fundamentos relacionados ao funcionamento dos transformadores de corrente, destacando sua função de reduzir proporcionalmente correntes elevadas para valores compatíveis com instrumentos de medição, proteção e controle. Observa-se que o desempenho do TC está relacionado à interação entre a corrente primária, o núcleo magnético e o circuito secundário, sendo influenciado por fatores como relação de transformação, corrente de excitação, carga secundária e saturação do núcleo. Além disso, erros de relação, de fase ou ligações inadequadas podem comprometer a fidelidade das grandezas medidas, reforçando a necessidade de correta especificação, instalação e verificação desses equipamentos em sistemas elétricos.

Sob essa perspectiva, torna-se inadequado avaliar um TC somente por seus dados nominais ou pela relação indicada em sua placa de identificação. O funcionamento real depende da interação entre o equipamento e as condições encontradas na instalação. Essa compreensão é especialmente importante durante atividades de manutenção, reforma ou intervenção em sistemas de medição, momentos em que mudanças aparentemente pequenas podem introduzir condições diferentes das previstas no projeto. Assim, uma avaliação técnica consistente precisa associar conhecimento teórico, inspeção das conexões e análise das grandezas efetivamente medidas, evitando conclusões fundamentadas exclusivamente em valores nominais.

A precisão representa outro aspecto fundamental na utilização dos transformadores de corrente em sistemas de medição de energia elétrica. Diferenças entre a corrente primária e sua correspondente representação secundária podem ser avaliadas por meio dos erros de relação e de fase. Enquanto o erro de

relação está associado à proporcionalidade entre os valores das correntes, o erro de fase está relacionado à diferença angular existente entre elas. Esses parâmetros são particularmente relevantes porque determinadas grandezas elétricas dependem tanto da magnitude quanto da relação fasorial entre tensão e corrente, podendo sofrer alterações quando a resposta do TC não corresponde às condições esperadas George et al., (2021).

Essa relação entre precisão e comportamento fasorial evidencia que valores de corrente aparentemente coerentes não são suficientes para assegurar que todo o sistema esteja operando corretamente. Uma análise restrita às magnitudes pode ocultar anormalidades relacionadas ao sentido ou à referência angular da corrente. Em sistemas trifásicos, essa questão se torna ainda mais relevante, pois as informações provenientes de diferentes fases são processadas conjuntamente para determinar potência e energia. Portanto, a avaliação dos TCs precisa considerar não apenas "quanto" de corrente está sendo medido, mas também como essa corrente está representada eletricamente no sistema.

Entre as condições capazes de comprometer a fidelidade da corrente secundária encontra-se a saturação do núcleo magnético. Quando o núcleo passa a operar fora da região adequada de resposta, a corrente reproduzida no circuito secundário pode apresentar distorções e deixar de representar corretamente a forma de onda existente no primário. Esse comportamento demonstra que os limites magnéticos do equipamento precisam ser considerados durante sua aplicação, principalmente em situações caracterizadas por correntes elevadas ou transitórias. A identificação dessas alterações é importante para diferenciar problemas decorrentes do próprio comportamento eletromagnético do TC daqueles relacionados às demais condições da instalação Martínez-Figueroa et al., (2023).

A distinção entre as possíveis origens de uma anormalidade constitui um dos pontos mais relevantes para o diagnóstico técnico. Nem toda diferença encontrada entre valores esperados e medidos decorre do mesmo fenômeno, e interpretar diferentes falhas como se possuíssem uma única causa pode conduzir a intervenções inadequadas. Dessa forma, saturação, erro de relação, conexão incorreta e inversão de polaridade precisam ser investigados considerando suas características específicas. Essa postura analítica amplia a confiabilidade do diagnóstico e permite que os dados obtidos durante a inspeção sejam utilizados como evidências para compreender o comportamento efetivamente apresentado pelo sistema.

2.1.1 Conceitos e aplicações dos transformadores de corrente

Os transformadores de corrente constituem dispositivos de instrumentação destinados a adequar correntes elevadas aos níveis compatíveis com equipamentos de medição, monitoramento e proteção, permitindo que informações do circuito de potência sejam utilizadas com maior segurança pelos sistemas associados. Sua aplicação não se restringe à redução proporcional da corrente, pois a qualidade da grandeza reproduzida também influencia a confiabilidade das informações empregadas na supervisão das instalações

elétricas. Em redes de distribuição, essa relação evidencia a importância da precisão do TC para assegurar maior consistência aos dados utilizados na medição e no acompanhamento operacional Teng et al., (2022).

Nesse contexto, compreender os conceitos e as aplicações dos TCs exige reconhecer sua posição estratégica entre o circuito elétrico e os instrumentos responsáveis pela interpretação das grandezas medidas. Quanto maior a dependência de sistemas automatizados e digitais, maior se torna a necessidade de garantir que a corrente disponibilizada ao sistema represente adequadamente a condição real da instalação. Assim, a escolha e a aplicação desses equipamentos não devem ser tratadas como procedimentos meramente acessórios, mas como decisões técnicas que interferem diretamente na qualidade do monitoramento, na interpretação dos dados e na confiabilidade do sistema de medição.

2.1.2 Princípio de funcionamento dos transformadores de corrente

O princípio de funcionamento dos transformadores de corrente fundamenta-se na indução eletromagnética estabelecida entre os circuitos primário e secundário, possibilitando que correntes elevadas sejam representadas em níveis adequados aos instrumentos de medição e monitoramento. A corrente que percorre o primário produz um fluxo magnético no núcleo, responsável por induzir no enrolamento secundário uma corrente relacionada à grandeza original e à relação de transformação do equipamento. Esse processo permite acompanhar o comportamento elétrico do circuito de potência sem submeter diretamente os instrumentos aos elevados níveis de corrente existentes na instalação Yimga et al., (2022).

A compreensão desse princípio demonstra que a atuação do TC depende de uma relação equilibrada entre fenômenos eletromagnéticos e condições efetivas de instalação. Não basta que exista transformação da corrente; é necessário que a grandeza secundária preserve informações suficientemente coerentes com o comportamento do circuito primário para sustentar uma medição confiável. Nesse sentido, características do núcleo, condições dos enrolamentos e integridade das conexões tornam-se elementos relevantes para o desempenho do conjunto. Essa interpretação é fundamental para esta pesquisa, pois permite compreender posteriormente como alterações nas ligações podem modificar a representação das grandezas elétricas.

2.1.3 Características construtivas e operacionais

As características construtivas dos transformadores de corrente estão diretamente relacionadas à capacidade de reproduzir grandezas elétricas de maneira compatível com as exigências de medição, proteção e monitoramento. Elementos como núcleo magnético, enrolamentos primário e secundário, materiais empregados e configuração do dispositivo influenciam sua resposta diante das condições impostas pelo circuito. Sob o aspecto operacional, essas particularidades determinam limites de funcionamento, sensibilidade e comportamento perante diferentes níveis de corrente. A integração entre características

construtivas e desempenho evidencia que a configuração física do TC exerce influência significativa sobre sua aplicação e resposta operacional Zhang et al., (2024).

Essa relação demonstra que a escolha de um TC não pode ser orientada exclusivamente pela compatibilidade entre valores nominais de corrente. As características do sistema em que o equipamento será instalado precisam ser consideradas conjuntamente, pois condições inadequadas de especificação, montagem ou conexão podem comprometer a qualidade das informações disponibilizadas aos instrumentos associados. Nesse sentido, compreender a construção do transformador torna-se também uma forma de antecipar seu comportamento em campo. Essa abordagem fortalece uma prática de engenharia mais criteriosa, na qual desempenho, confiabilidade e segurança são tratados como dimensões interdependentes durante a seleção e a operação desses equipamentos.

2.2 TRANSFORMADORES DE CORRENTE APLICADOS À MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

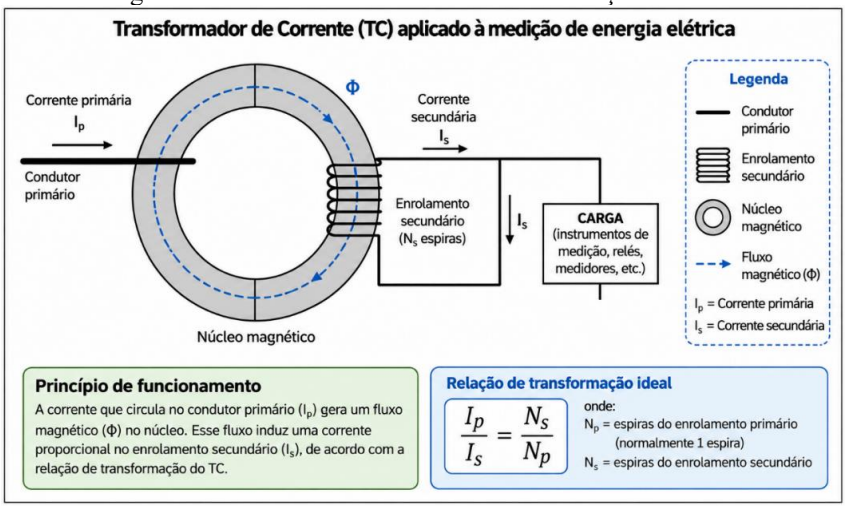
A aplicação dos transformadores de corrente em sistemas de medição de energia elétrica está associada à necessidade de converter correntes elevadas em valores adequados aos instrumentos responsáveis pela aquisição e processamento das grandezas elétricas. Nesse processo, o TC atua como elemento intermediário entre o circuito de potência e o sistema de medição, possibilitando o acompanhamento da corrente sem conexão direta dos equipamentos aos elevados níveis presentes na instalação. A qualidade dessa transformação torna-se determinante para que os valores disponibilizados aos instrumentos sejam representativos das condições elétricas efetivamente existentes no circuito monitorado Hu et al., (2024).

Além da utilização na aquisição das correntes, os transformadores de corrente podem integrar sistemas nos quais medição, controle e proteção dependem da interpretação adequada das grandezas provenientes do circuito elétrico. Nessas aplicações, as condições dos enrolamentos, a configuração das conexões e a correspondência entre os circuitos precisam ser consideradas durante a avaliação do desempenho. Uma falha associada ao TC pode repercutir sobre diferentes funções do sistema, demonstrando que sua utilização exige atenção não apenas à seleção do equipamento, mas também à maneira como suas características são integradas às necessidades operacionais da instalação Ilyas & Agassy, (2022).

Diante disso, a aplicação dos TCs à medição de energia deve ser compreendida como parte de uma cadeia técnica na qual cada etapa interfere na confiabilidade do resultado produzido. Essa perspectiva assume particular relevância quando os registros são utilizados para acompanhamento remoto, diagnóstico ou tomada de decisão, pois uma informação inconsistente pode conduzir a interpretações inadequadas sobre o comportamento da instalação. Assim, verificar a coerência entre corrente primária, resposta secundária e

dados registrados constitui uma prática indispensável para distinguir alterações reais de consumo de anormalidades relacionadas ao próprio sistema de medição.

Figura 2 - Transformador de Corrente na Medição Elétrica.



Fonte: Próprio autor, (2026).

A compreensão da aplicação dos transformadores de corrente em sistemas de medição torna-se mais clara quando se observa a relação estabelecida entre o circuito primário, o núcleo magnético e o circuito secundário. Conforme apresentado na Figura 1, a corrente primária produz o fluxo magnético responsável pela indução da corrente secundária, disponibilizando ao sistema de instrumentação uma grandeza proporcional e adequada aos equipamentos de medição. Essa representação permite visualizar como o TC estabelece a interface entre o circuito de potência e os instrumentos associados, evidenciando a importância da relação de transformação para a obtenção de informações confiáveis sobre o comportamento elétrico da instalação.

2.2.1 Aplicação dos TCs em sistemas de medição

A aplicação dos transformadores de corrente em sistemas de medição está relacionada à necessidade de disponibilizar aos instrumentos valores de corrente compatíveis com suas condições de funcionamento, preservando informações relevantes do circuito monitorado. Nesse contexto, os TCs desempenham função intermediária entre a instalação de potência e os equipamentos responsáveis pelo registro das grandezas elétricas, permitindo que medição, supervisão e outras funções associadas sejam realizadas de forma adequada. Sua utilização requer atenção às características do equipamento e às condições de conexão, uma vez que falhas nesses elementos podem comprometer o desempenho do sistema Ilyas & Agassy, (2022).

A presença dos TCs na cadeia de medição evidencia que a confiabilidade dos registros depende não apenas da tecnologia empregada pelo medidor, mas também da qualidade com que a corrente é

disponibilizada ao instrumento. Essa constatação exige uma abordagem técnica que considere especificação, montagem, correspondência entre fases e integridade das conexões como elementos indissociáveis do processo de medição. Assim, a identificação de valores atípicos deve estimular uma análise sistêmica da instalação, evitando atribuir imediatamente as inconsistências ao consumo ou ao medidor e reconhecendo que o próprio circuito de transformação pode constituir a origem da anormalidade.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa caracteriza-se pela investigação sistemática de uma ocorrência técnica identificada em um sistema trifásico de medição de energia elétrica, envolvendo transformadores de corrente e integração com telemetria. O estudo concentra-se na análise das condições encontradas durante a ocorrência, nos dados elétricos registrados, nas verificações realizadas em campo e nas modificações observadas após a intervenção técnica. Essa delimitação permite relacionar evidências empíricas ao problema investigado e organizar procedimentos capazes de responder aos objetivos estabelecidos, mantendo coerência entre objeto, coleta, tratamento e interpretação das informações obtidas ao longo da investigação Gil, (2022).

No desenvolvimento da pesquisa, a caracterização metodológica foi estruturada de modo a permitir a compreensão da falha em seu contexto real de funcionamento. A unidade de análise corresponde ao sistema de medição investigado, com atenção específica aos TCs instalados nas fases A, B e C, às conexões primárias e secundárias e aos registros disponibilizados pela telemetria. Foram consideradas as condições verificadas durante a ocorrência e aquelas observadas posteriormente à correção, possibilitando examinar como alterações na instalação se refletiram nas grandezas monitoradas. Essa organização fornece uma sequência lógica entre identificação, diagnóstico, intervenção e avaliação dos resultados.

3.1.1 Natureza e abordagem da pesquisa

Quanto à natureza, a pesquisa classifica-se como aplicada, pois busca produzir conhecimento direcionado à compreensão e solução de um problema técnico concreto relacionado à instalação e ao funcionamento de transformadores de corrente empregados na medição de energia elétrica. Em relação à abordagem, apresenta predominância quantitativa, uma vez que utiliza valores de corrente primária e secundária, relação de transformação e registros de grandezas elétricas para analisar objetivamente a ocorrência. A pesquisa aplicada orienta-se para problemas específicos e para a utilização prática dos conhecimentos produzidos durante o processo investigativo Prodanov & Freitas, (2013).

A escolha da abordagem quantitativa mostra-se coerente com o problema estudado porque a identificação dos efeitos das falhas depende da comparação objetiva entre valores mensuráveis. Entretanto, os números não foram considerados de maneira isolada, pois sua interpretação exigiu relacioná-los às

condições físicas das conexões encontradas durante a inspeção. Desse modo, os dados quantitativos forneceram evidências para verificar a magnitude das alterações, enquanto a análise técnica da instalação possibilitou compreender sua origem. Essa articulação permite evitar que variações numéricas sejam interpretadas sem considerar a configuração efetivamente existente no sistema de medição.

3.1.2 Objetivos e procedimentos técnicos

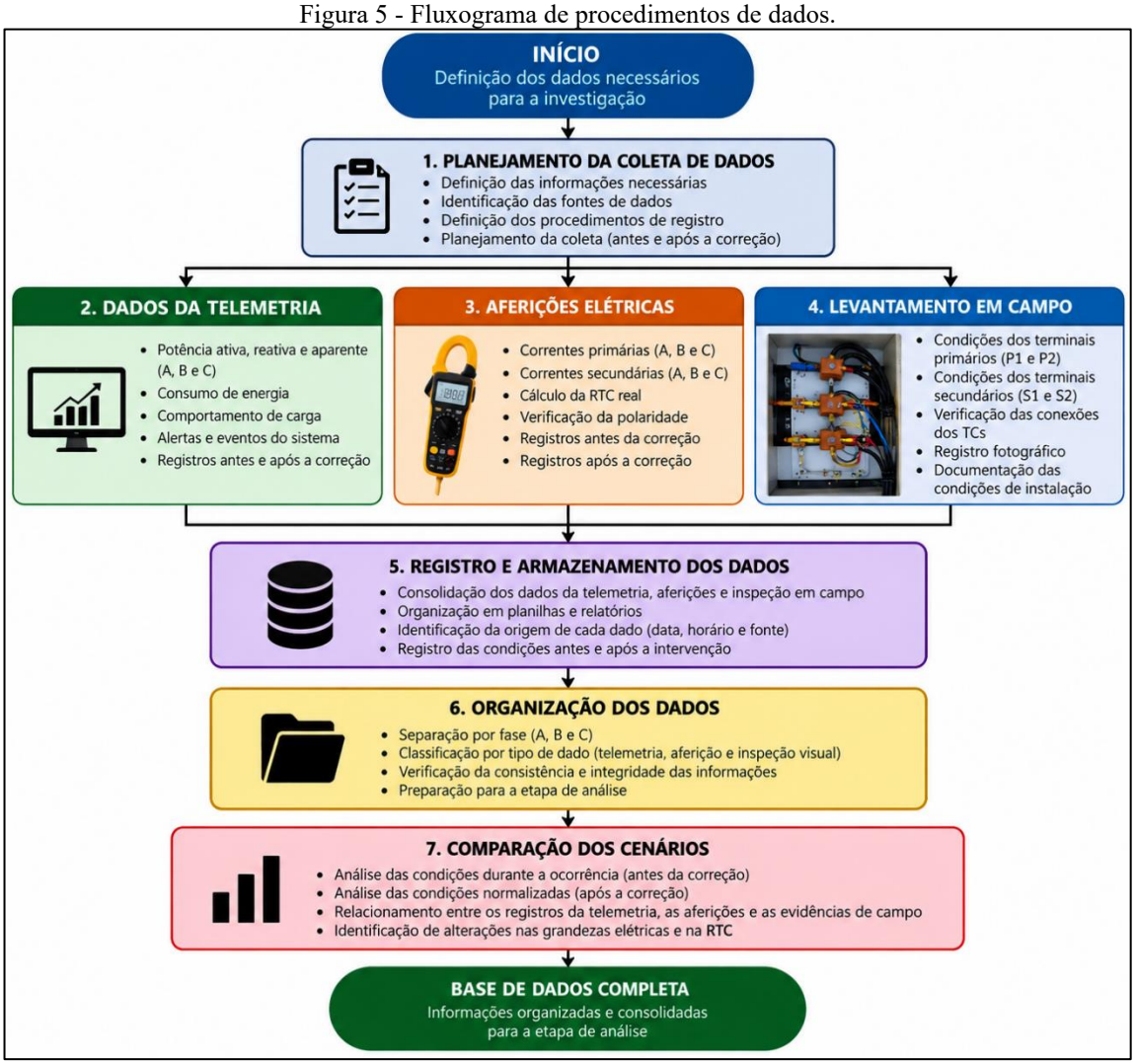
Quanto aos objetivos, a pesquisa apresenta caráter descritivo e analítico, uma vez que descreve as condições verificadas no sistema de medição e examina as relações existentes entre as falhas identificadas e as alterações observadas nas grandezas elétricas. Em relação aos procedimentos técnicos, adota-se o estudo de caso, apoiado pela análise de registros provenientes da telemetria, medições realizadas no sistema e inspeção das conexões dos transformadores de corrente. A definição dos procedimentos metodológicos deve manter correspondência com o problema e os objetivos da investigação, permitindo selecionar estratégias adequadas à produção e análise das evidências necessárias Creswell & Creswell, (2021).

A organização desses procedimentos foi estabelecida para reconstruir tecnicamente a ocorrência e verificar seus efeitos de maneira comparativa. Inicialmente, foram examinados os registros que indicavam comportamento anormal do sistema; posteriormente, as condições de instalação foram verificadas em campo e as correntes foram aferidas. Após a identificação das irregularidades, realizaram-se as correções necessárias e novas verificações foram efetuadas. Essa sequência permite confrontar evidências provenientes de diferentes etapas, reduzindo a dependência de uma única informação e fortalecendo a interpretação sobre a relação entre configuração dos TCs, comportamento das grandezas elétricas e normalização observada após a intervenção.

3.1.3 Procedimentos de coleta de dados

A coleta de dados foi organizada a partir de diferentes fontes relacionadas à ocorrência: registros disponibilizados pelo sistema de telemetria, aferições das correntes primárias e secundárias e levantamento das condições físicas de instalação dos transformadores de corrente. A utilização de diferentes procedimentos permite reunir evidências complementares e ampliar a compreensão do objeto investigado, desde que cada informação coletada esteja diretamente relacionada aos objetivos da pesquisa. O planejamento da coleta deve definir previamente quais dados são necessários, de onde serão obtidos e como serão registrados, assegurando organização e consistência ao processo investigativo Marconi & Lakatos, (2021).

Figura 5 - Fluxograma de procedimentos de dados.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2026).

Operacionalmente, a coleta foi estruturada para permitir a reconstrução das condições existentes durante a ocorrência e sua posterior comparação com o cenário normalizado. Foram registrados valores das grandezas disponíveis, condições dos terminais primários e secundários e resultados das aferições efetuadas antes e após a intervenção. Os dados foram organizados de acordo com as fases A, B e C, permitindo analisar cada conjunto separadamente e posteriormente estabelecer comparações. Esse procedimento também possibilitou relacionar os sinais inicialmente observados remotamente às evidências verificadas em campo, formando uma base documental e numérica para a etapa de análise.

3.1.4 Dados provenientes da telemetria

Os dados provenientes da telemetria foram utilizados como fonte inicial para caracterização do comportamento do sistema de medição durante a ocorrência. Foram considerados os registros disponíveis relacionados às grandezas elétricas monitoradas, com atenção às alterações capazes de indicar comportamento incompatível com o padrão operacional esperado. A utilização de registros produzidos

anteriormente ou simultaneamente ao fenômeno investigado constitui importante recurso documental, pois possibilita recuperar informações sem depender exclusivamente da observação realizada no momento da pesquisa. A análise documental exige seleção e organização criteriosas das informações relevantes aos objetivos estabelecidos Severino, (2017).

Na aplicação do procedimento, os registros de telemetria foram examinados buscando identificar mudanças no comportamento das grandezas, particularmente ocorrências de potência ativa negativa e redução abrupta do consumo registrado. Esses sinais foram tratados como indicadores para direcionamento da investigação, e não como confirmação isolada da causa da falha. A interpretação considerou que diferentes condições podem produzir alterações nos registros remotos, tornando necessária sua confrontação com medições e inspeções em campo. Assim, a telemetria desempenhou função de rastreamento da ocorrência e forneceu referências temporais para comparar o comportamento anterior e posterior à intervenção técnica.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 CONTEXTO DA OCORRÊNCIA

O estudo de caso foi adotado como estratégia central por possibilitar a investigação aprofundada de um fenômeno contemporâneo inserido em seu contexto real, especialmente quando a compreensão do problema depende da análise conjunta das condições técnicas e das evidências disponíveis. Neste trabalho, o caso corresponde à ocorrência identificada em um sistema trifásico de medição indireta de energia elétrica integrado à telemetria, no qual foram verificadas irregularidades relacionadas à polaridade dos transformadores de corrente e ao circuito secundário. Essa estratégia favorece a utilização articulada de diferentes fontes de evidência para compreender o fenômeno investigado Yin, (2018).

A escolha do estudo de caso possibilitou preservar as particularidades da ocorrência sem transformar uma situação específica em regra universal para todos os sistemas de medição. O interesse da investigação está em compreender tecnicamente como as irregularidades identificadas se manifestaram naquele sistema e quais indicadores contribuíram para o diagnóstico. Dessa maneira, os resultados serão interpretados dentro dos limites do caso analisado, buscando extrair contribuições práticas para inspeção e diagnóstico de situações semelhantes. Essa delimitação também favorece a construção de um checklist técnico fundamentado nas etapas efetivamente relevantes para identificação e correção das anormalidades encontradas.

A Unidade Consumidora A, cuja identificação é preservada por razões de sigilo profissional e comercial, é atendida em sistema trifásico com medição indireta de energia elétrica. O conjunto de medição é composto por três transformadores de corrente (TCs), um por fase, com relação nominal de 300/5 A,

equivalente à relação de transformação de corrente (RTC) de 60/1. Nessa configuração, as correntes elevadas do circuito de potência são reduzidas a níveis adequados para leitura pelo medidor de energia.

A unidade é acompanhada por sistema de medição inteligente com telemetria da concessionária Amazonas Energia. Esse recurso permite observar remotamente grandezas como potência ativa, consumo e comportamento de carga, além de emitir alertas quando são identificadas condições incompatíveis com o perfil elétrico esperado da instalação.

Figura 6 – Comunicação modem 3G telemetria estrutura de funcionamento.



Fonte: Próprio Autor, Utilizando a ferramenta IA (2026).

O sistema de medição com telemetria 3G permite acompanhar o consumo de energia elétrica de forma remota. Os dados registrados pelo medidor, como consumo, tensão e corrente, são enviados por meio de um modem 3G para a rede móvel e, posteriormente, encaminhados ao centro de monitoramento da concessionária. Esse sistema facilita o acompanhamento das medições, a identificação de falhas e o controle do fornecimento de energia.

A ocorrência foi identificada após uma reforma elétrica no padrão de entrada da unidade consumidora. Durante essa intervenção, os TCs foram removidos, reinstalados e tiveram suas ligações secundárias refeitas. Posteriormente, o sistema de telemetria registrou uma condição anômala: potência ativa negativa nas três fases, associada à redução atípica do consumo contabilizado. Como a unidade não possuía condição operacional de geração distribuída ou exportação de energia para a rede, o comportamento indicava uma possível falha no sistema de medição.

Diante dessa situação, foi realizada uma análise das conexões dos transformadores de corrente, com o objetivo de verificar possíveis erros de ligação ou inversão de polaridade. A inspeção permitiu relacionar a anomalia registrada pelo sistema de telemetria às alterações realizadas durante a reforma elétrica,

demonstrando a importância da correta instalação dos TCs para garantir a confiabilidade dos dados de medição. A verificação técnica também permitiu confirmar a necessidade de conferir a sequência das fases e o sentido das correntes medidas. Após a correção das ligações, os valores registrados passaram a apresentar comportamento compatível com o consumo real da unidade. Dessa forma, o sistema de telemetria demonstrou ser uma ferramenta importante para a identificação rápida de irregularidades na medição.

Figura 7 - ocorrência identificada em um sistema trifásico.



Fonte: Próprio autor, (2026).

4.2 PROBLEMA IDENTIFICADO

O problema central consistiu na incorreta remontagem do sistema de medição após a reforma elétrica. A inspeção técnica identificou duas não conformidades distintas e correlatas:

Inversão da polaridade primária dos TCs das fases A, B e C, com os terminais P1 e P2 posicionados em sentido oposto ao fluxo de energia esperado, isto é, com P1 voltado para o lado da carga e P2 voltado para o lado da fonte.

Ligação indevida no circuito secundário do TC da fase C, onde o terminal S1 estava conectado simultaneamente ao borne de corrente do medidor e ao condutor neutro do padrão de medição.

A primeira falha afetava o sentido fasorial da corrente nas três fases. A segunda afetava especificamente a magnitude da corrente efetivamente entregue ao medidor na fase C. Portanto, não se tratava de uma única anomalia, mas de uma falha composta: inversão de polaridade generalizada e divisão indevida de corrente em uma das fases.

Figura 8 – Identificação dos TCS Invertidos nas três fases.



Fonte: Próprio autor, (2026).

4.3 EVIDÊNCIAS E ANÁLISE TÉCNICA

A primeira evidência foi o alerta de telemetria indicando potência ativa negativa nas três fases. Em condições normais de consumo, considerando a tensão como fasor de referência, a corrente de uma carga predominantemente indutiva apresenta pequeno atraso angular, e a potência ativa é positiva, conforme a expressão:

$$P = V \cdot I \cdot cos(\varphi)$$

Em que:

P = potência ativa, expressa em watts (W);

V = tensão eficaz, em volts (V);

I = corrente eficaz, em ampères (A);

$cos(\varphi)$ = fator de potência; e φ corresponde ao ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente.

Quando o TC é instalado com polaridade primária invertida, a corrente secundária fornecida ao medidor sofre inversão de 180°. Assim, o fasor de corrente passa a apresentar sentido oposto ao esperado, fazendo com que o medidor interprete o consumo como fluxo de energia da unidade para a rede. Matematicamente, o valor da potência passa a ter sinal negativo:

$$P_{inv} = -V \cdot I \cdot cos(\varphi)$$

Em que:

P_{inv} = potência ativa registrada na condição de inversão de polaridade;

V = tensão eficaz, em volts (V);

I = representa a corrente eficaz, em ampères (A);

$cos(\varphi)$ = corresponde ao fator de potência;

A inspeção visual confirmou que os três TCs estavam orientados de forma contrária ao diagrama de medição: o terminal P1, que deveria estar voltado para a fonte, encontrava-se voltado para a carga. Essa constatação explicou o registro simultâneo de potência negativa nas fases A, B e C.

Como segunda etapa, foram aferidas as correntes primárias e secundárias de cada fase com instrumento de medição apropriado. A RTC real foi calculada pela razão entre a corrente primária aferida e a corrente secundária aferida:

$$RTC_r = \frac{I_p}{I_s}$$

Em que:

RTC_r = relação de transformação de corrente real;

I_p = corrente primária aferida, expressa em ampères (A);

I_s = corrente secundária aferida, também expressa em ampères (A).

Para TCs de 300/5 A, a RTC nominal é igual a 60. Considerando a margem de tolerância de ±3% utilizada no caso, a faixa aceitável de RTC real é de 58,20 para menos e a 61,80 para mais.

Tabela 1 - Evidências e análise técnica.

Fase	Corrente primária I_p	Corrente secundária I_s	RTC real	Situação observada
A	16,60 A	0,28 A	59,28	Dentro da faixa, porém com polaridade invertida
B	15,90 A	0,26 A	61,15	Dentro da faixa, porém com polaridade invertida
C	16,30 A	0,03 A	543,33	Muito acima da faixa; indício de desvio de corrente

Fonte: Próprio autor, 2026.

As fases A e B apresentaram RTCs dentro da faixa de aceitação. Contudo, isso não caracterizava normalidade completa, pois a RTC avalia a magnitude da corrente, enquanto a falha dessas fases estava

relacionada ao sentido fasorial. Assim, mesmo com relação de transformação próxima da nominal, a potência continuava sendo registrada com sinal negativo devido à inversão de polaridade.

Na fase C, a RTC real de 543,33 ficou muito acima do limite superior de 61,80. A inspeção detalhada das ligações secundárias verificou que o terminal S1 do TC possuía uma derivação indevida para o condutor neutro, além da ligação para o borne do medidor. Essa condição criou um caminho paralelo para a corrente secundária.

Pela Lei de Kirchhoff das correntes, a corrente produzida pelo TC passou a se dividir entre a bobina de corrente do medidor e o caminho indevido conectado ao neutro:

$$I_s = I_m + I_{fuga}$$

Em que:

I_s= corrente secundária total fornecida pelo TC;

I_m= corrente do medidor, parcela de corrente que alcança o meddor;

I_{fuga}= corrente de fuga, parcela de corrente desviada pelo caminho paralelo.

Como $I_m < I_s$, a corrente efetivamente medida tornou-se muito menor que a corrente secundária esperada. Como consequência, o valor calculado de $RTC_r = I_p/I_m$ aumentou de forma expressiva, causando submedição na fase C.

A análise conjunta das evidências permitiu separar os mecanismos das falhas:

Tabela 2 - A análise conjunta das evidências mecanismos das falhas.

Aspecto analisado	Falha identificada	Consequência principal
Orientação dos TCs	P1 e P2 invertidos nas três fases	Inversão de 180° no fasor de corrente e potência ativa negativa
RTC das fases A e B	Próxima da relação nominal	Magnitude adequada, mas sinal de potência incorreto
Ligação secundária da fase C	S1 conectado ao medidor e ao neutro	Divisor de corrente e RTC real excessivamente elevada
Registro de energia	Incompatível com a operação física da unidade	Possível submedição e inconsistência no faturamento

Fonte: Próprio autor, (2026).

4.4 INTERVENÇÃO CORRETIVA

A intervenção foi executada com base no diagrama aplicável ao sistema de medição indireta, respeitando os procedimentos de segurança e a necessidade de manter o circuito secundário dos TCs adequadamente fechado durante as atividades. Foram realizadas as seguintes ações:

Análise da placa foi adotada como uma etapa de segurança e de confirmação técnica antes da correção, pois permitiu verificar a relação nominal do equipamento, a RTC de referência, a identificação dos terminais e a compatibilidade entre o TC instalado.

Figura 8 – Placa de identificação do Transformador de Corrente.



Fonte: Próprio autor, (2026).

Reorientação física dos TCs das três fases, restabelecendo a posição correta dos terminais primários: P1 voltado para o lado da fonte e P2 voltado para o lado da carga.

Correção das ligações secundárias, com conferência da identificação dos terminais S1 e S2 de cada TC e sua associação aos respectivos bornes de corrente do medidor.

Eliminação da derivação indevida entre o terminal S1 do TC da fase C e o condutor neutro, restabelecendo uma malha secundária única entre o TC e o medidor.

Verificação da continuidade dos condutores secundários, dos bornes de teste e da correspondência entre a tensão e a corrente de cada fase.

Realização de novas aferições de corrente primária e secundária após a correção, seguida do recálculo da RTC real por fase.

Conferência do sinal da potência ativa no sistema de medição e na telemetria, a fim de validar a compatibilidade entre o sentido físico do fluxo de energia e o registro efetuado pelo medidor.

Além da correção pontual, o caso demonstrou a importância de realizar comissionamento técnico sempre que houver remoção, reforma ou reinstalação de TCs. Esse procedimento deve incluir inspeção da orientação P1/P2, verificação da continuidade S1/S2, confirmação da associação de fases, análise do sinal de potência e cálculo da RTC real.

4.5 CÁLCULO DA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO DE CORRENTE

O cálculo da relação de transformação de corrente foi realizado a partir dos valores aferidos nos circuitos primário e secundário de cada TC. Para cada fase, a RTC real foi determinada pela razão entre a corrente primária medida e a corrente secundária correspondente, permitindo posteriormente confrontar o resultado com a relação nominal especificada para o equipamento. O emprego de procedimentos quantitativos baseados em relações matemáticas favorece a descrição objetiva dos dados e possibilita estabelecer comparações entre situações distintas, desde que as variáveis utilizadas sejam definidas de maneira consistente e submetidas aos mesmos critérios de tratamento Vergara, (2016).

Para a análise, adotou-se a expressão $_{RTC=}$ IP/IS, em que IP representa a corrente primária aferida e IS a corrente secundária correspondente. Os resultados foram calculados individualmente para as fases A, B e C nas condições anterior e posterior à correção. A interpretação não se limitou à proximidade numérica em relação à RTC nominal, pois uma relação aparentemente adequada não exclui falhas de polaridade quando são consideradas apenas magnitudes. Dessa forma, o cálculo foi tratado como indicador complementar, especialmente relevante para evidenciar alterações capazes de reduzir a corrente que efetivamente alcança o equipamento de medição.

4.6 ANÁLISE DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS

A análise das grandezas elétricas foi conduzida a partir da organização dos registros disponíveis e da verificação das relações existentes entre os diferentes parâmetros observados durante a ocorrência. O procedimento analítico buscou reconhecer padrões, discrepâncias e mudanças relevantes, relacionando os resultados quantitativos às condições técnicas identificadas no sistema. A análise de dados requer ultrapassar a simples apresentação dos valores coletados, promovendo sua interpretação à luz do problema investigado e estabelecendo relações capazes de produzir significado para as evidências obtidas durante a pesquisa Bardin, (2016).

Nesse processo, receberam atenção especial o sentido das correntes, os registros de potência ativa e as diferenças observadas entre as fases. A ocorrência de valores negativos de potência foi analisada em conjunto com a polaridade identificada nos TCs, evitando considerar o sinal isoladamente como prova suficiente da falha. Da mesma forma, a corrente secundária reduzida foi confrontada com a corrente primária e com a configuração física do circuito. Essa leitura integrada possibilitou distinguir alterações relacionadas à referência fasorial daquelas decorrentes de modificações efetivas no percurso da corrente secundária, fortalecendo a consistência do diagnóstico.

4.7 COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES ANTES E APÓS A CORREÇÃO

A comparação das condições antes e após a correção foi utilizada para avaliar as modificações ocorridas no sistema de medição após a intervenção técnica. Esse procedimento considerou os mesmos grupos de informações nos dois momentos, incluindo correntes primárias e secundárias, RTC e comportamento das grandezas disponibilizadas pelo sistema. A comparação sistemática permite reconhecer semelhanças e diferenças entre situações investigadas, contribuindo para interpretar mudanças relacionadas às condições estabelecidas durante o processo de análise e evitando conclusões baseadas exclusivamente em observações pontuais ou desvinculadas do contexto em que os dados foram produzidos Gil, (2022).

A etapa comparativa constituiu o fechamento da sequência metodológica, pois permitiu verificar se a correção das conexões foi acompanhada pela normalização dos indicadores anteriormente considerados anormais. Foram confrontados os valores por fase, observando-se especialmente a aproximação da RTC real em relação à condição nominal, a recuperação da corrente secundária da fase C e o comportamento dos registros de potência. A interpretação dessas mudanças foi realizada conjuntamente, evitando atribuir causalidade a uma única variável. Dessa forma, a condição posterior funcionou como referência empírica para avaliar a coerência do diagnóstico estabelecido durante a investigação.

4.8 RESULTADOS OBTIDOS

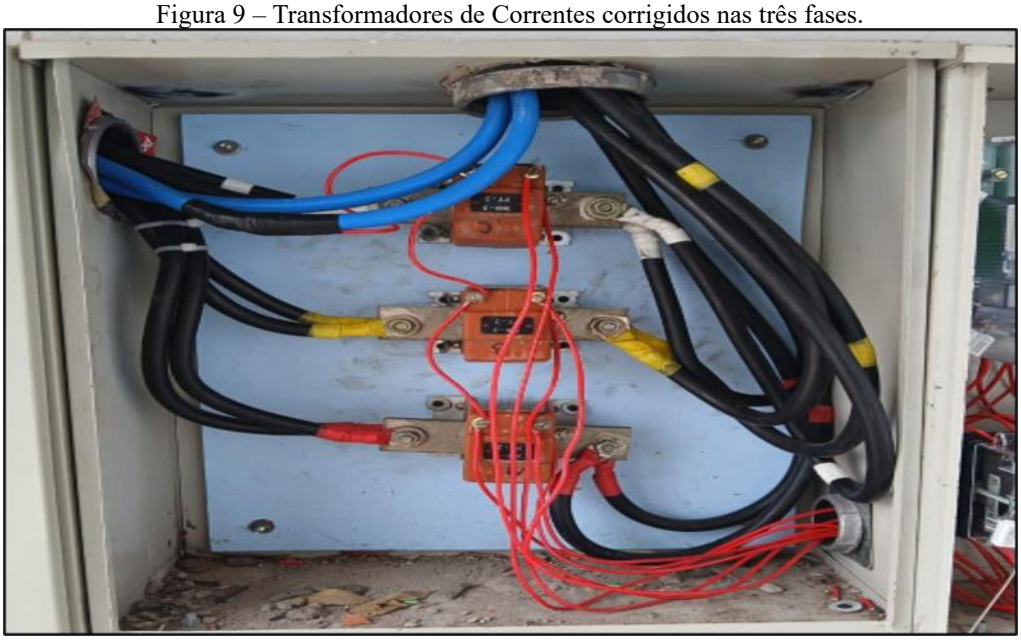
Após a correção da orientação dos TCs e da ligação secundária da fase C, foram realizadas novas medições nas mesmas condições operacionais da unidade consumidora. Os resultados estão apresentados a seguir.

Tabela 3 - Resultados aferidos no TC.

Fase	I_p	I_s	**RTC real após correção**	**Situação final**
A	16,40 A	0,27 A	60,74	Dentro da faixa de 58,20 a 61,80
B	16,10 A	0,27 A	59,63	Dentro da faixa de 58,20 a 61,80
C	16,80 A	0,28 A	60	Dentro da faixa; relação nominal restabelecida

Fonte: Próprio autor, (2026).

Figura 9 – Transformadores de Correntes corrigidos nas três fases.



Fonte: Próprio autor, 2026.

Os resultados confirmaram a normalização da medição. As RTCs reais das três fases ficaram dentro da margem de ±3% em torno do valor nominal de 60. A fase C apresentou a alteração mais expressiva: sua RTC foi reduzida de 543,33 para 60,00, evidenciando que a eliminação da ligação paralela ao neutro restabeleceu integralmente a corrente secundária que deveria alcançar o medidor.

Também foi constatado o retorno do registro de potência ativa positiva nas três fases, coerente com o fluxo físico de energia da rede para a unidade consumidora. Dessa forma, a intervenção corrigiu tanto o erro de sentido associado à polaridade quanto o erro de magnitude associado ao divisor de corrente.

A comparação entre a situação anterior e a condição final é apresentada a seguir.

Tabela 4 - A comparação entre a situação anterior e a condição final.

Fase	RTC antes da correção	RTC após a correção	Interpretação
A	59,28	60,74	A magnitude já era aceitável; a correção eliminou a inversão de polaridade
B	61,15	59,63	A magnitude já era aceitável; a correção eliminou a inversão de polaridade
C	543,33	60	A correção eliminou o divisor de corrente e restabeleceu a medição

Fonte: Próprio autor, 2026.

Conclui-se que o alerta de potência negativa foi fundamental para iniciar a investigação, mas não seria suficiente, isoladamente, para identificar todas as falhas. A combinação entre análise fasorial, inspeção física da orientação dos TCs, conferência das ligações secundárias e cálculo da RTC por fase permitiu identificar a causa raiz e validar tecnicamente a intervenção. O caso evidencia que uma reforma sem conferência de comissionamento pode introduzir falhas de polaridade e de ligação secundária capazes de comprometer o faturamento, a confiabilidade da telemetria e a rastreabilidade do sistema de medição.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir do estudo de caso, relacionando as evidências provenientes da telemetria, das aferições das correntes primárias e secundárias e da inspeção física dos transformadores de corrente. A discussão foi estruturada de modo a distinguir os efeitos associados à inversão de polaridade daqueles decorrentes da irregularidade identificada especificamente no circuito secundário da fase C. Também são comparadas as condições anteriores e posteriores à intervenção, buscando verificar o atendimento aos objetivos estabelecidos e demonstrar de que maneira a integração entre dados remotos e inspeções em campo contribuiu para o diagnóstico da ocorrência.

5.1 ANÁLISE DOS EFEITOS DA INVERSÃO DE POLARIDADE

A inspeção realizada no sistema de medição identificou que os transformadores de corrente das fases A, B e C apresentavam orientação primária contrária à configuração de referência adotada na instalação. Os terminais P1 encontravam-se direcionados para o lado da carga, enquanto P2 estava voltado para o lado da fonte. Essa condição alterava a referência de polaridade das correntes fornecidas ao sistema de medição. Em transformadores de corrente, a correta identificação da polaridade é necessária para preservar a correspondência entre as grandezas primárias e secundárias e permitir que os instrumentos conectados interpretem adequadamente o sentido dos sinais elétricos (Mahmoud & Elwakil, 2024).

No caso analisado, uma das manifestações associadas à condição encontrada foi o registro de potência ativa negativa nas três fases pelo sistema de telemetria. Considerando que a unidade consumidora apresentava fluxo esperado de energia da rede para a carga e não havia condição operacional prevista de exportação de energia, esse comportamento representou um indício relevante de anormalidade. A inversão da referência da corrente em relação à tensão correspondente modifica a interpretação fasorial realizada pelo sistema de medição e, consequentemente, pode alterar o sinal atribuído à potência ativa. Assim, a ocorrência simultânea nas três fases mostrou-se coerente com a orientação física encontrada durante a inspeção.

A análise das correntes, entretanto, revelou um aspecto importante: a inversão de polaridade não necessariamente produz uma alteração expressiva na magnitude da relação de transformação calculada

utilizando valores absolutos. Antes da correção, a fase A apresentou corrente primária de 16,60 A e secundária de 0,28 A, correspondendo a uma RTC de 59,28. Na fase B, foram registrados 15,90 A e 0,26 A, resultando em RTC de 61,15. Ambos os resultados permaneceram próximos da relação nominal de 60/1, apesar de os respectivos TCs estarem com a orientação primária invertida.

Esse resultado demonstra que a verificação isolada da proporcionalidade entre as magnitudes das correntes não é suficiente para confirmar a correta instalação de um transformador de corrente. Um equipamento pode apresentar relação entre corrente primária e secundária aparentemente compatível com sua relação nominal e, simultaneamente, fornecer ao sistema uma referência de polaridade inadequada. Dessa forma, o diagnóstico deve associar a análise da RTC à orientação de P1/P2, à correspondência entre fases, à representação fasorial e ao comportamento das potências registradas. Essa constatação constitui um dos principais resultados técnicos obtidos no estudo.

5.2 ANÁLISE DA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO DE CORRENTE (RTC)

A relação nominal dos transformadores utilizados no sistema analisado era de 300/5 A, correspondendo a uma RTC nominal de 60/1. Para avaliar o comportamento dos equipamentos, a RTC real foi determinada pela razão entre a corrente primária e a corrente secundária aferidas em cada fase. A análise dessa relação constitui importante recurso para verificar a proporcionalidade entre as grandezas e identificar desvios que possam estar associados ao comportamento do transformador ou às condições existentes no circuito de medição. Estudos metrológicos envolvendo TCs demonstram que a relação entre os sinais primário e secundário constitui parâmetro fundamental para avaliação do desempenho da transformação de corrente (You et al., 2024).

Antes da intervenção, os resultados apresentaram diferenças significativas entre as fases. A fase A apresentou RTC de 59,28 e a fase B, 61,15, ambas próximas do valor nominal. A fase C, entretanto, apresentou corrente primária de 16,30 A e corrente secundária aferida de apenas 0,03 A. A relação calculada entre esses valores resultou em uma RTC aparente de aproximadamente 543,33. Esse resultado destoava significativamente tanto da relação nominal do TC quanto dos valores encontrados nas demais fases, indicando que a investigação da fase C deveria considerar uma condição adicional à inversão de polaridade presente nos três transformadores.

A diferença observada também permitiu estabelecer uma distinção importante entre polaridade e relação de transformação. Nas fases A e B, a RTC permaneceu próxima de 60 mesmo com a orientação primária incorreta. Na fase C, por outro lado, o valor extremamente elevado decorreu da corrente secundária muito reduzida no ponto de aferição. Portanto, a RTC de 543,33 não foi interpretada como uma modificação da relação nominal física do transformador, mas como uma relação aparente produzida pelas condições

existentes no circuito secundário. Essa interpretação evitou atribuir à inversão de polaridade um efeito que, na realidade, estava relacionado a outra irregularidade da instalação.

Após a intervenção, os valores calculados foram de 60,74 para a fase A, 59,63 para a fase B e 60,00 para a fase C. A aproximação das três fases em relação à RTC nominal, especialmente a mudança da fase C de 543,33 para 60,00, constituiu uma evidência objetiva da normalização do sistema. Mais do que demonstrar o resultado da correção, essa comparação reforçou a importância de utilizar medições realizadas antes e depois da intervenção como recurso de validação do diagnóstico técnico.

5.3 ANÁLISE DA FALHA NO CIRCUITO SECUNDÁRIO DA FASE C

A investigação da fase C revelou uma condição distinta daquela encontrada nas demais fases. Durante a inspeção física, verificou-se que o terminal S1 apresentava ligação simultânea ao circuito destinado ao medidor e ao condutor neutro, estabelecendo um caminho paralelo no circuito secundário. A presença dessa derivação modificava a configuração prevista para a corrente produzida pelo TC. Em circuitos secundários de transformadores de corrente, as condições de conexão e as impedâncias associadas aos elementos conectados influenciam o comportamento da corrente disponibilizada ao sistema de medição (Jung et al., 2007).

A interpretação dessa condição foi realizada considerando que, diante da existência de caminhos paralelos, a corrente secundária poderia distribuir-se entre diferentes trajetórias. A parcela efetivamente direcionada ao ramo associado ao medidor dependeria das impedâncias presentes em cada caminho. Como essas impedâncias individuais não foram determinadas experimentalmente durante a ocorrência, não é possível estabelecer quantitativamente qual parcela da corrente percorreu cada trajetória. Entretanto, a configuração física encontrada, associada à corrente secundária de apenas 0,03 A e à posterior normalização após a retirada da derivação, fornece evidências consistentes da influência dessa irregularidade sobre a medição da fase C.

O impacto quantitativo foi expressivo. Com uma corrente primária de 16,30 A e secundária aferida de 0,03 A, a RTC aparente atingiu 543,33 antes da correção. Após a eliminação do caminho paralelo, a corrente primária foi aferida em 16,80 A e a secundária em 0,28 A, produzindo RTC de exatamente 60,00. A alteração da corrente secundária constitui, portanto, uma evidência particularmente relevante, pois ocorreu após a regularização da configuração física e aproximou a relação calculada do valor nominal especificado para o transformador.

A fase C demonstrou, dessa maneira, a possibilidade de coexistência de diferentes falhas em um mesmo sistema de medição. A inversão da orientação primária estava presente nas três fases, enquanto a irregularidade secundária foi identificada apenas na fase C. Essa diferenciação é fundamental para o diagnóstico, pois impede que todas as manifestações sejam atribuídas a uma única causa. O caso evidencia

que comportamentos anormais devem ser investigados considerando tanto a polaridade quanto a integridade e a topologia dos circuitos secundários.

5.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ANTES E APÓS A CORREÇÃO

A comparação das condições anteriores e posteriores à intervenção possibilitou avaliar objetivamente os efeitos das correções executadas. Antes da intervenção, as fases A e B apresentavam RTCs próximas da relação nominal, embora os transformadores estivessem com a orientação primária invertida. A fase C, além da mesma condição de polaridade, apresentava uma irregularidade no circuito secundário e RTC extremamente elevada. Após a regularização das conexões, verificou-se maior coerência entre as correntes primárias e secundárias e a aproximação das relações calculadas ao valor nominal de 60/1.

Tabela 5 - Comparação dos resultados antes e após a correção.

Fase	Ip antes (A)	Is antes (A)	RTC antes	Ip após (A)	Is após (A)	RTC após
A	16,60	0,28	59,28	16,40	0,27	60,74
B	15,90	0,26	61,15	16,10	0,27	59,63
C	16,30	0,03	543,33	16,80	0,28	60,00

Fonte: Próprio autor, 2026.

Os dados evidenciam que a mudança mais expressiva ocorreu na fase C. Enquanto as RTCs das fases A e B permaneceram próximas do valor nominal nos dois momentos, a fase C apresentou redução de 543,33 para 60,00. Essa diferença reforça a interpretação de que a anormalidade de magnitude nessa fase estava associada à condição particular do circuito secundário e não exclusivamente à inversão de polaridade. A comparação também evidencia a importância de analisar cada fase individualmente, mesmo quando o sistema de telemetria indica inicialmente um comportamento semelhante entre elas.

Após a correção da orientação dos TCs e a eliminação da derivação identificada na fase C, os registros do sistema passaram a apresentar comportamento compatível com a condição operacional esperada. A convergência entre normalização física das conexões, recuperação da corrente secundária da fase C, aproximação das RTCs ao valor nominal e regularização do sinal da potência constitui um conjunto de evidências que fortalece a validade do diagnóstico realizado. Dessa forma, a comparação antes/depois não foi utilizada apenas para apresentar resultados, mas também como procedimento de confirmação da relação entre as falhas encontradas e as anormalidades inicialmente registradas.

5.5 CONTRIBUIÇÃO DA TELEMETRIA PARA O DIAGNÓSTICO

A telemetria desempenhou papel relevante na identificação inicial da ocorrência, pois possibilitou perceber remotamente alterações incompatíveis com o comportamento esperado da unidade consumidora.

Os registros de potência ativa negativa nas três fases e a redução atípica do consumo contabilizado constituíram sinais que justificaram o aprofundamento da investigação. Métodos voltados à identificação de erros de polaridade demonstram que a análise da relação entre grandezas elétricas pode fornecer informações importantes para reconhecer configurações incompatíveis com a operação esperada dos transformadores para instrumentos (Mahmoud & Elwakil, 2024).

Os resultados do estudo, contudo, demonstram que a telemetria deve ser compreendida como instrumento de apoio ao diagnóstico e não como mecanismo suficiente para determinar isoladamente a origem de uma falha. A potência negativa indicava uma anormalidade, mas não permitia identificar, por si só, que os três TCs estavam orientados de forma inadequada nem que a fase C possuía uma derivação específica no circuito secundário. Essas condições somente foram esclarecidas mediante inspeção física, aferição das correntes e análise das relações de transformação.

A principal contribuição da telemetria esteve, portanto, na capacidade de antecipar a percepção do problema e direcionar a atuação em campo. Em vez de depender exclusivamente de inspeções periódicas, o acompanhamento remoto possibilitou identificar alterações no comportamento das grandezas e estabelecer um ponto de partida para a investigação. A integração entre monitoramento remoto e verificação presencial mostrou-se mais eficiente do que a utilização isolada de qualquer uma dessas fontes, pois permitiu confrontar o comportamento registrado eletronicamente com as condições reais das conexões.

5.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EM RELAÇÃO AOS OBJETIVOS DA PESQUISA

Em relação ao objetivo geral, os resultados permitiram analisar os efeitos das irregularidades de polaridade e das conexões dos TCs sobre o sistema trifásico de medição integrado à telemetria. A investigação demonstrou que a inversão de P1/P2 esteve associada, no caso analisado, à alteração da referência das correntes e ao registro de potência ativa negativa, enquanto a anormalidade extrema da RTC na fase C esteve relacionada à configuração inadequada do circuito secundário. Dessa forma, foi possível diferenciar tecnicamente fenômenos que poderiam ser confundidos caso a análise se limitasse a apenas uma das grandezas disponíveis.

Quanto ao primeiro objetivo específico, referente à identificação dos efeitos da inversão P1/P2 nas fases A, B e C, constatou-se que a falha alterava principalmente a referência direcional da corrente em relação às demais grandezas do sistema. As fases A e B constituíram evidência particularmente importante, pois mantiveram RTCs próximas da nominal mesmo diante da inversão de polaridade. Esse resultado demonstra que uma relação de transformação numericamente adequada não constitui evidência suficiente para afirmar que a instalação do TC está correta.

O segundo objetivo específico, relacionado à análise da condição secundária S1/S2 na fase C, também foi atendido. A inspeção identificou uma derivação envolvendo S1, e a aferição revelou corrente

secundária de apenas 0,03 A antes da intervenção. A consequente RTC aparente de 543,33 demonstrou a dimensão da anormalidade. Após a eliminação do caminho paralelo, a corrente secundária passou para 0,28 A e a RTC atingiu 60,00, fornecendo evidência quantitativa da normalização do circuito.

O terceiro objetivo específico foi contemplado pela comparação das condições anteriores e posteriores à intervenção. Os resultados demonstraram que as correções foram acompanhadas pela normalização das grandezas avaliadas, especialmente na fase C. A comparação permitiu não apenas verificar a efetividade da intervenção, mas também fortalecer o diagnóstico estabelecido, uma vez que a retirada das irregularidades físicas produziu mudanças coerentes nos parâmetros anteriormente considerados anormais.

Por fim, o objetivo referente à avaliação da contribuição da telemetria foi atendido ao demonstrar que o sistema remoto foi capaz de fornecer indícios relevantes da ocorrência, principalmente por meio dos registros de potência ativa negativa e da alteração do consumo. Entretanto, o estudo também demonstrou os limites dessa ferramenta: a telemetria identificou o comportamento anormal, mas a determinação das causas exigiu inspeção e aferição em campo. A principal contribuição encontrada foi, portanto, a integração entre telemetria, medição e inspeção física como estratégia de diagnóstico.

5.7 PROPOSTA DE CHECKLIST TÉCNICO

Com base nas evidências obtidas durante o estudo de caso, propõe-se a adoção de um checklist técnico para utilização em instalações, manutenções, reformas e comissionamentos envolvendo transformadores de corrente destinados à medição de energia elétrica. A proposta decorre diretamente das falhas identificadas, especialmente porque as irregularidades ocorreram após a retirada e reinstalação dos TCs durante uma intervenção no padrão de entrada. O checklist busca reduzir a possibilidade de que erros de polaridade, associação entre fases ou conexões secundárias permaneçam sem identificação após a conclusão dos serviços.

Tabela 6 - Proposta de checklist técnico.

Etapa	Item de verificação	Critério
Identificação	Conferir dados de placa do TC	Relação, classe e identificação compatíveis com o projeto
Circuito primário	Verificar P1 e P2	Orientação conforme diagrama/configuração adotada
Circuito primário	Conferir associação das fases A, B e C	Cada TC associado à fase correspondente
Circuito secundário	Verificar S1 e S2	Terminais corretamente identificados e conectados
Circuito secundário	Verificar derivações não previstas	Ausência de caminhos paralelos indevidos
Circuito secundário	Conferir continuidade	Circuito íntegro e conforme configuração prevista
Medição	Aferir corrente primária	Registrar Ip de A, B e C
Medição	Aferir corrente secundária	Registrar Is de A, B e C
RTC	Calcular (RTC=Ip/Is)	Comparar com a relação nominal
Grandezas	Verificar sinal da potência ativa	Compatível com o fluxo de energia esperado
Telemetria	Conferir registros após intervenção	Ausência das anormalidades anteriormente identificadas
Validação	Comparar antes e depois	Confirmar normalização das grandezas
Documentação	Registrar intervenção	Fotografias, valores aferidos, data e responsável

Fonte: Próprio autor, (2026).

A aplicação do checklist deve ocorrer preferencialmente antes da energização definitiva e ser repetida após intervenções que envolvam remoção, substituição ou reconexão dos transformadores de corrente. A experiência obtida neste estudo demonstra que a simples verificação visual da presença dos equipamentos não é suficiente para garantir a confiabilidade da medição. É necessário conferir a orientação dos terminais, a associação entre fases, a integridade do circuito secundário e a coerência entre as grandezas medidas e o comportamento esperado da instalação.

Dessa forma, a principal contribuição prática dos resultados consiste na consolidação de um procedimento de diagnóstico baseado em evidências complementares. O estudo demonstrou que polaridade correta, RTC compatível e circuito secundário íntegro devem ser avaliados conjuntamente, pois cada um desses elementos revela aspectos diferentes do funcionamento do sistema. A associação dessas verificações aos registros de telemetria amplia a capacidade de identificar anormalidades e permite validar a condição da instalação após intervenções, contribuindo para maior confiabilidade, rastreabilidade e segurança operacional da medição de energia elétrica.

Conclui-se, portanto, que o diagnóstico confiável de irregularidades em transformadores de corrente requer mais do que a simples comparação entre a RTC calculada e a relação nominal do equipamento. O estudo demonstrou que a avaliação deve considerar conjuntamente polaridade, correntes primárias e secundárias, configuração dos circuitos, comportamento das potências, representação fasorial e registros provenientes da telemetria. A experiência analisada evidencia que a integração entre monitoramento remoto e verificação técnica em campo constitui uma estratégia relevante para identificar, confirmar e corrigir anormalidades em sistemas de medição de energia elétrica. Dessa forma, o trabalho contribui para o aprimoramento dos procedimentos de inspeção, diagnóstico e validação, favorecendo maior confiabilidade, rastreabilidade e segurança operacional dos sistemas de medição que utilizam transformadores de corrente.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. (2021). **Resolução Normativa ANEEL nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021**: Estabelece as regras de prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica. ANEEL.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021). **ABNT NBR 6856**: Transformador de corrente — Especificação e ensaios. ABNT.

BARDIN, L. (2016). **Análise de conteúdo**. Edições 70.

CRESWELL, J. W., & CRESWELL, J. D. (2021). **Projeto de pesquisa**: Métodos qualitativo, quantitativo e misto. Penso.

DAS, J. C. (2020). Current transformers. In **Arc flash hazard analysis and mitigation**. Wiley-IEEE Press. https://doi.org/10.1002/9781119709787.ch12

D'AVANZO, G., DELLE FEMINE, A., GALLO, D., LANDI, C., & LUISO, M. (2020). Impact of inductive current transformers on synchrophasor measurement in presence of modulations. **Measurement**, 155, 107535. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107535

FACHIN, O. (2017). **Fundamentos de metodologia**. Saraiva.

FAIFER, M., LAURANO, C., OTTOBONI, R., & TOSCANI, S. (2024). A new method to represent the harmonic measurement accuracy of current transformers. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 73, 1–11. https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3353857

FIGUEIREDO, C., et al. (2024). **Eletricidade matricial**. Editora Castell.

GAN, M., YOU, H., & YUAN, J. (2024). Online measurement method and system of excitation impedance of current transformers based on Norton's theorem and differential method to measure difference of two currents. **Sensors**, 24(10), 3115. https://doi.org/10.3390/s24103115

GEORGE, N., VOOKA, P., BANDI, A. S. K., & GOPALAKRISHNA, S. (2021). A novel dual slope conversion technique for measurement of ratio and phase errors of current transformer using comparison method of testing. **Measurement**, 179, 109458. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109458

GIL, A. C. (2022). Como elaborar projetos de pesquisa (7ª ed.). **Atlas**.

HU, Y., OTTOBONI, R., & LI, J. (2024). A novel method for DC current measurement using current transformer. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 73, 1–9. https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3463012

ILYAS, I., & AGASSY, M. T. (2022). Analisis kegagalan current transformer (CT) tipe dua belitan sekunder dengan inti magnetik terpisah pada sistem proteksi dan pembatas daya. **Sainstech: Jurnal Penelitian dan Pengkajian Sains dan Teknologi**, 32(1). https://doi.org/10.37277/stch.v32i1.1240

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. (2012). **IEC 61869-2**: Instrument transformers — Part 2: Additional requirements for current transformers. IEC.

JUNG, J. K., KANG, J. H., LEE, S. H., & KIM, M. (2007). In-situ measurement of the current transformer burden in a current transformer testing system using a shunt resistor. **Measurement**, 40(9–10), 876–882. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2006.11.017

MAHMOUD, R. A., & ELWAKIL, E. S. (2024). Correlation-based polarity-check algorithm for instrument transformers. **Journal of Electrical Systems and Information Technology**, 11, Article 49. https://doi.org/10.1186/s43067-024-00172-y

MAMEDE FILHO, J. (2017). **Instalações elétricas industriais** (9ª ed.). LTC.

MARCONI, M. de A., & LAKATOS, E. M. (2021). Fundamentos de metodologia científica (9ª ed.). **Atlas**.

MARTÍNEZ-FIGUEROA, G. de J., CÓRCOLES-LÓPEZ, F., & BOGARRA, S. (2023). FPGA-based smart sensor to detect current transformer saturation during inrush current measurement. **Sensors**, 23(2), 744. https://doi.org/10.3390/s23020744

MARTINS, G. de A. (2008). Estudo de caso: Uma estratégia de pesquisa (2ª ed.). **Atlas**.

MINKNER, R., & SCHMID, J. (2022). The technology of instrument transformers: Current and voltage measurement and insulation systems. Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-34863-2

MWONGELA, MELLO., & CHANG, YONNY. (2022). **Transformadores de corrente**: Fundamentos, polaridade e aplicações em sistemas de medição de energia elétrica. Editora Haastel.

ODINAEV, O., et al. (2024). Análise de sistemas de transmissão de energia elétrica. **Atlas**.

LI, F., et al. (2024). **Sistemas de transmissão de energia elétrica**. Editora Hoomero.

PEREIRA, A. S., SHITSUKA, D. M., PARREIRA, F. J., & SHITSUKA, R. (2018). **Metodologia da pesquisa científica**. Universidade Federal de Santa Maria.

PRODANOV, C. C., & FREITAS, E. C. de. (2013). **Metodologia do trabalho científico**: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico (2ª ed.). Feevale.

RICHARDSON, R. J. (2017). Pesquisa social: Métodos e técnicas (4ª ed.). **Atlas**.

SEVERINO, A. J. (2017). **Metodologia do trabalho científico** (24ª ed.). Cortez.

STANO, E., & KACZMAREK, M. (2022). Analytical method to determine the values of current error and phase displacement of inductive current transformers during transformation of distorted currents higher harmonics. **Measurement**, 200, 111664. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111664

TENG, J., WANG, S., JIANG, L., XIE, W., FANG, C., & LIU, S. (2022). An online self-correction method to improve accuracy of split-core current transformer in low-voltage distribution networks. **Measurement**, 195, 111052. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111052

VERGARA, S. C. (2016). Projetos e relatórios de pesquisa em administração (16ª ed.). **Atlas**.

YIMGA, A. D., TAFO, E. W., & ZOBO, B. E. (2022). Performances of current monitor for a long pulse width sensing. **Measurement**, 189, 110475. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110475

YIN, R. K. (2018). **Case study research and applications**: Design and methods (6th ed.). SAGE Publications.

YOU, H., GAN, M., DUAN, D., ZHAO, C., Lv, F., & YUAN, J. (2024). Approach of obtaining the error of current transformers through the measurement of turns correction factor and impedance. **Sensors and Actuators A: Physical**, 376, 115566. https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115566

ZHANG, Z., CHEN, B., TIAN, C., CHEN, Y., & WANG, Y. (2024). A novel measurement-protection-integrated current transformer based on hybrid core and magnetic field sensor. **IET Electric Power Applications**, 18(7), 739–755. https://doi.org/10.1049/elp2.12417