



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2026) v. 13, n. 1, p. 29–48
<https://doi.org/10.21712/lajer.2026.v13.n1.p29-48>

Diagnóstico e simulação de falha em um transformador de potencial capacitivo de 345 kV

Diagnosis and failure simulation of a 345 kV capacitive voltage transformer

Arthur Carolino Soares¹, Clainer Bravin Donadel^{2,*}, Alcebíades Rangel Bessa³

¹ Egresso do curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Espírito Santo – Ifes, campus Vitória, ES, Brasil.

² Professor do Instituto Federal do Espírito Santo – Ifes, campus Vitória, ES, Brasil.

³ Engenheiro Eletricista, Manutenção e Operação Transmissão de Energia Elétrica, AXIA ENERGIA, Operação Sudeste.

*Autor para correspondência, E-mail: cdonadel@ifes.edu.br.

Received: 26 January 2026 | Accepted: 15 April 2026 | Published online: 29 April 2026

Resumo: Este trabalho investigou a falha de um transformador de potencial capacitivo (TPC) de 345 kV, cujo secundário apresentou tensão nula, com o objetivo de elucidar suas causas e características por meio de abordagens experimentais e computacionais. A metodologia incluiu inspeção visual detalhada, que revelou um traço condutivo na placa de conexões da bobina primária do transformador de potencial indutivo (TPI) e umidade na caixa de base, seguida de ensaios elétricos realizados em três etapas: antes da desmontagem, após a desmontagem e após a remoção da trilha condutiva, e o desenvolvimento de um modelo MATLAB/Simulink capaz de simular condições normais e de falha. Os resultados experimentais demonstraram que a presença da trilha condutiva provocava um curto-circuito severo no primário do TPI, anulando a relação de transformação, enquanto sua remoção restaurava os parâmetros a valores próximos aos nominais, estabelecendo uma relação causal clara. A simulação computacional validou esses resultados ao reproduzir a tensão nula no secundário quando um curto era inserido no primário. A umidade na caixa de base foi identificada como fator determinante, pois degrada o isolamento e favorece a formação de caminhos condutivos. Concluiu-se que a falha do TPC teve origem em um curto-circuito no enrolamento primário do TPI, materializado pela trilha condutiva na placa de conexões e facilitado pela umidade, comprometendo medições. A convergência de evidências visuais, experimentais e simuladas confere alta confiabilidade às conclusões e reforça a aplicabilidade da simulação computacional como ferramenta diagnóstica e de análise de riscos.

Palavras-chave: Transformador de potencial capacitivo; curto-circuito; análise de causa raiz; coluna capacitiva.

Abstract: This study investigated the failure of a 345 kV capacitive voltage transformer (CVT) whose secondary output exhibited zero voltage, aiming to elucidate its causes and characteristics through experimental and computational approaches. The methodology comprised a detailed visual inspection, which revealed a conductive trace on the connection board of the primary winding of the inductive voltage transformer (IVT) and the presence of moisture inside the base enclosure, followed by electrical tests conducted in three stages: before disassembly, after disassembly, and after removal of the conductive trace. In addition, a MATLAB/Simulink model was developed to simulate both normal operating conditions and fault scenarios. Experimental results demonstrated that the conductive trace caused a severe short circuit in the IVT primary winding, nullifying the transformation ratio, while its removal restored the electrical parameters to values close to nominal, establishing a clear causal relationship. Computational simulations corroborated these findings by reproducing the zero secondary voltage when a short circuit was introduced in the primary winding. Moisture inside the base enclosure was identified as a determining factor, as it degrades insulation and promotes the formation of conductive paths. It was concluded that the CVT failure originated from a short circuit in the IVT primary winding, manifested by the conductive trace on the connection board and facilitated by moisture, thereby compromising measurement reliability. The

convergence of visual, experimental, and simulated evidence lends high confidence to the conclusions and reinforces the applicability of computational simulation as a diagnostic and risk analysis tool.

Keywords: capacitive voltage transformer; short-circuit; root cause analysis; capacitive divider column.

1 Introdução

O setor elétrico brasileiro é regido por princípios fundamentais que visam garantir a eficiência e a sustentabilidade, como a estipulação de regras claras, a competitividade no mercado, o fornecimento de energia a preços justos para os consumidores, a minimização dos impactos ambientais, o suporte à demanda e a racionalização entre oferta e demanda.

Diante das exigências criteriosas que o sistema elétrico brasileiro possui, o sistema como um todo é dividido em vários agentes, cada um com sua atribuição. Dentre esses agentes, há a transmissão que, devido às características do sistema, necessita de uma infraestrutura robusta, composta por linhas de transmissão e subestações, que permitem o transporte da energia gerada até os centros de consumo. Para viabilizar essa transmissão, é utilizada uma complexa rede de cabos elétricos, em conjunto com torres de transmissão, isoladores, disjuntores, reatores, compensadores e transformadores, entre outros componentes. Esses ativos demandam elevados investimentos e, em virtude de suas características, configuram um monopólio natural do mercado. Tal cenário torna essencial a existência de mecanismos regulatórios que simulem condições típicas de um mercado competitivo. Isso inclui a busca por eficiência produtiva, a modicidade tarifária, o acesso não discriminatório às redes e a indução de investimentos por meio de licitações públicas e metas de desempenho (Pessanha et al., 2010; Pires et al., 2002).

A regulação da transmissão de energia elétrica é realizada por meio do controle da receita das empresas transmissoras. Cada instalação tem uma receita anual estabelecida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que é calculada com base na disponibilidade dos ativos¹ (Pessanha et al., 2010). Dentro desse contexto, sabendo que a disponibilidade dos ativos é dependente dos períodos de retirada dos equipamentos para manutenção, a ANEEL define diretrizes específicas para a categorização dos tipos de intervenção quanto ao prazo da solicitação, sendo elas: Intervenção programada em regime normal (IP), Intervenções programadas em regime de urgência (IPU), Intervenções de urgência (IU) e Intervenções de emergência (EM) (ANEEL, 2020).

À luz dessas classificações, a ANEEL criou um mecanismo com o objetivo de reduzir o tempo de indisponibilidade dos equipamentos considerados de Função de Transmissão, como transformadores, dispositivos de controle de tensão e linhas de transmissão. Esse mecanismo, que visa estimular a qualidade do serviço prestado pelas transmissoras, é conhecido como Parcela Variável (PV) (Diniz, 2021; Aquino and Vale, 2009). Uma das componentes da PV que pode ser aplicada é a Parcela Variável por Indisponibilidade (PVI), que consiste em um desconto na remuneração das concessionárias em razão de indisponibilidades nas instalações, tendo como objetivo maximizar a disponibilidade das estruturas e reduzir os períodos de inatividade dos equipamentos. Os critérios para sua aplicação estão estipulados na Resolução Normativa nº 906/2020 da ANEEL (ANEEL, 2020) e levam em consideração diversos parâmetros, como o período da ocorrência, o tipo de equipamento e o número de desligamentos ao longo do mês.

Portanto, é evidente a preocupação das empresas do setor em manter o bom funcionamento dos equipamentos presentes nas instalações, com o objetivo de evitar penalidades contratuais e despesas desnecessárias. Para isso, é necessário o monitoramento constante das condições desses equipamentos, por exemplo, por meio de manutenções preventivas e do acompanhamento dos parâmetros dos equipamentos, o que possibilita a avaliação eficiente de indícios e tendências apresentados por esses dispositivos antes da ocorrência de falhas. Dessa forma, torna-se possível o planejamento e a programação antecipada das intervenções, evitando retiradas emergenciais e manutenções imprevistas, o que contribui para a mitigação de grandes prejuízos às concessionárias do setor elétrico.

Nesse contexto, existem os chamados transformadores para instrumentos, que reduzem os níveis de tensão e corrente da rede para os dispositivos que fazem essas medições. Assim, um dos equipamentos que pertencem a esse grupo e tem grande destaque no monitoramento de parâmetros no setor de transmissão é o transformador de potencial capacitivo (TPC), um dos equipamentos que integram a Rede Básica. A Rede Básica é o conjunto de subestações, linhas de transmissão e demais componentes do Sistema Interligado Nacional (SIN) que operam em tensões iguais ou superiores a 230 kV e contribuem para o faturamento das

¹ A receita anual de cada instalação é o valor fixo anual pago às transmissoras pela disponibilização de suas instalações, sujeito a penalidades por descumprimento regulatório.

concessionárias (ANEEL, 2022). Considerando que esse equipamento está classificado pela ANEEL como parte da Rede Básica, seu funcionamento é de suma importância, pois falhas nesse dispositivo impactam diretamente os circuitos de medição, proteção e comunicação do sistema elétrico.

Levando em consideração a importância crítica dos TPCs para o monitoramento e proteção do sistema, é fundamental compreender seus modos de falha. A literatura científica tem se concentrado na análise desses eventos, bem como em simulações de transitórios e investigações sobre ferorrressonância. A seguir, são resumidos estudos relevantes focados no diagnóstico e monitoramento de falhas em TPCs:

- **Tensão nula no secundário:** Zhou et al. (2016) investigaram um TPC de 220kV com tensão nula. A causa foi a degradação de um supressor de surto, que evoluiu para uma baixa impedância, causando um curto-circuito e zerando a tensão no primário do Transformador de Potencial Indutivo (TPI).
- **Variação na saída e aquecimento:** Ouyang et al. (2023) relataram aquecimento anômalo e tensão secundária irregular. A investigação apontou um vazamento de óleo que expôs os capacitores, gerando descargas parciais, colapso dielétrico e, conseqüentemente, saturação do núcleo.
- **Variação na saída (ferorrressonância):** Davarpanah et al. (2012) atribuíram falhas recorrentes à saturação de transformadores auxiliares (devido a fatores de tensão inadequados). Isso desencadeou ferorrressonância, gerando sobretensões que degradaram os capacitores.
- **Variação na saída (curto-circuito interno):** Bing et al. (2021) investigaram um alarme de proteção diferencial de barra em uma subestação de 220 kV. A falha manifestou-se como uma anomalia de tensão severa: a fase A aumentou para 185 kV, enquanto as fases B e C permaneceram estáveis em 133 kV. A investigação identificou a causa raiz como um curto-circuito em uma célula capacitiva. Esta falha interna gerou descargas e a conseqüente instabilidade na tensão secundária.
- **Variação na saída (falhas sutis e descargas):** Xuan et al. (2020) investigaram uma variação na tensão secundária que excedia o erro permitido para equipamentos de medição. A causa provável foi a ruptura de células capacitivas, provavelmente por descargas atmosféricas. O estudo alerta que falhas pequenas na coluna capacitiva são difíceis de detectar em testes de pré-operação (cujos resultados variam com o nível de tensão), mas ainda assim causam grandes desvios. Por isso, propõem o monitoramento em tempo real da condição dos capacitores, sugerindo o uso da tensão de sequência zero como referência.
- **Deteção de anomalia de isolamento (IA):** He et al. (2023) propuseram um método de avaliação online usando aprendizado auto supervisionado. O modelo (baseado em autoencoder e GATv2) analisa a sequência residual da tensão secundária para detectar anomalias na isolamento interna.

Apesar dos estudos existentes sobre tensão nula (Zhou et al., 2016) e diversas anomalias na saída (Ouyang et al., 2023; Bing et al., 2021), observa-se uma lacuna na literatura. Falta uma análise de falha detalhada, incluindo a modelagem computacional, para um caso específico de tensão secundária nula em um TPC que combine o diagnóstico de campo com a simulação do fenômeno.

Este estudo é motivado por um evento específico que ilustra essa lacuna: durante uma inspeção de rotina em uma subestação de energia elétrica, foi detectada uma variação de temperatura atipicamente alta em um TPC de 345 kV com histórico de operação estável. Em seguida, a medição da tensão no secundário apresentou-se zerada, demandando a imediata retirada do transformador por questões de segurança.

Assim, o objetivo deste trabalho é investigar as causas e características da falha ocorrida no TPC objeto de estudo, que resultou em tensão nula no secundário. Para tal, primeiramente é investigada a natureza da falha, analisando suas possíveis causas e conseqüências técnicas; em seguida, uma representação desta falha é implementada e analisada em ambiente de simulação computacional, visando modelar o comportamento do equipamento e contribuir para procedimentos futuros de prevenção e mitigação.

2 Metodologia

O trabalho foi estruturado a partir de estudos que visam propor medidas e respostas capazes de contribuir para a compreensão e prevenção de falhas no setor industrial de subestações de energia elétrica. Para tanto, foi realizado um estudo envolvendo a falha de um transformador de potencial capacitivo (TPC), instalado em uma linha de transmissão de 345 kV, representado na Figura 1.



Figura 1. Transformador de potencial capacitivo objeto de estudo.

Foram realizados ensaios elétricos com o objetivo de avaliar as condições das diferentes seções do equipamento. A partir da análise dos resultados e da identificação da causa da tensão nula no secundário do TPC, foram desenvolvidas modelagens e simulações do sistema. Considerando que o equipamento entrou em operação em 1989, foram utilizados dados históricos e informações técnicas disponíveis na placa do fabricante como parâmetros de referência para comparação com os resultados obtidos nos ensaios.

A pesquisa adota elementos da metodologia sistemática de Análise de Causa Raiz (*Root Cause Analysis – RCA*), cujo foco está na identificação das causas fundamentais de um problema, evitando a limitação a sintomas superficiais da falha. Assim, a condução do trabalho baseia-se na identificação da falha, na coleta dos dados disponíveis e relevantes, e na análise estruturada dessas informações, visando compreender tanto a origem quanto as consequências do evento observado.

2.1 Estrutura e componentes do transformador de potencial capacitivo

O TPC é comumente utilizado para medição e proteção em sistemas de energia elétrica de alta tensão, especialmente em níveis superiores a 138 kV. O diagrama esquemático básico do equipamento é apresentado na Figura 2, e ilustra seus componentes funcionais. Para fins de análise e modelagem, a tensão linha-terra será denominada V_{LT} . Os principais componentes, cujas características e funções são detalhados subsequentemente, são o divisor de tensão capacitivo (composto por C1 e C2), o transformador de potencial indutivo (TPI), o reator de compensação (L) e o circuito supressor de ferorrressonância (CSF). A Figura 2 detalha ainda elementos auxiliares relevantes para a operação e manutenção do equipamento, como o centelhador (*gap*) e a chave de aterramento (E).

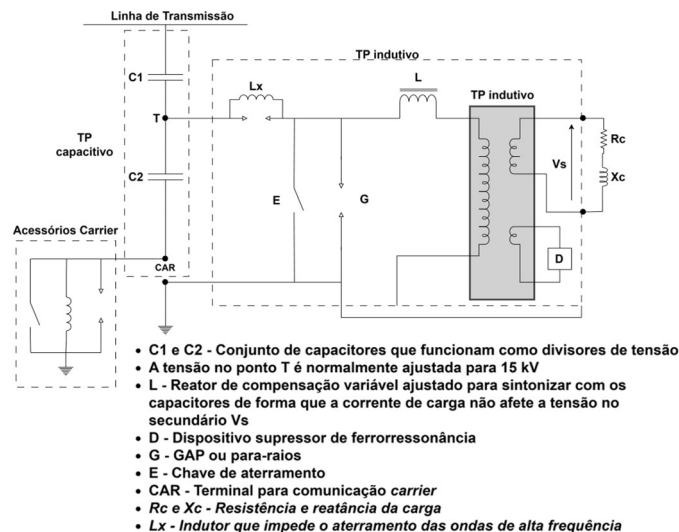


Figura 2. Circuito equivalente de um transformador de potencial capacitivo. Fonte: adaptado de Mamede Filho (2013, p. 396).

2.1.1 Divisor de tensão capacitivo

O divisor de tensão capacitivo é formado por duas capacitâncias equivalentes, C1 e C2, compostas por células capacitivas conectadas em série (Lachman, 2007; Mamede Filho, 2013). O ponto T entre elas fornece uma tensão intermediária—usualmente entre 5 kV e 15 kV (Trench Eletric, 1982)—que é aplicada ao primário do TPI e determinada pela Eq. 1, considerando-se desprezível a corrente drenada pelo TPI.

$$V_T = \frac{V_{LT} \cdot C1}{C1 + C2} \quad (1)$$

2.1.2 Reator de compensação

O reator de compensação L, com reatância variável XL, corrige o deslocamento de fase introduzido pelo divisor capacitivo. Sua função é garantir que a tensão no secundário esteja em fase com a primária, o que é essencial para manter a classe de exatidão (Mamede Filho, 2013) e reproduzir fielmente os transitórios e o regime permanente do circuito de alta tensão (Lachman, 2007).

2.1.3 Transformador de potencial indutivo

O TPI opera por conversão eletromagnética, usando enrolamentos primário e secundário em um núcleo de ferro-silício comum (Mamede Filho, 2013). Sua função é reduzir a tensão intermediária do divisor (na faixa de 5 kV a 15 kV) para um valor compatível com os instrumentos. Usualmente, o TPI também possui derivações (*taps*) que são usadas para ajustes finos na amplitude do sinal de saída secundário (Camargo, 2015).

2.1.4 Circuito supressor de ferrorressonância (CSF)

As capacitâncias do TPC podem entrar em ressonância com os núcleos ferromagnéticos do TPI e do reator de compensação, fenômeno conhecido como ferrorressonância. Isso causa oscilações na forma de onda secundária, o que é intolerável para medição e proteção, pois pode gerar dados incorretos ou sinais destrutivos. Para mitigar esse efeito, um circuito supressor de ferrorressonância é inserido no TPI (Sweetana and Flugum, 1966).

2.1.5 Terminal de alta frequência – comunicação *carrier*

O divisor capacitivo também atua como capacitor de acoplamento para o sistema de comunicação *Carrier* (ondas portadoras de 30-500 kHz). Sua alta impedância em 60 Hz e baixa impedância em altas frequências permitem a sintonia do sinal, bloqueando a interferência da rede elétrica (Frontin et al., 2013).

2.2 Coleta de dados e informações preliminares

Esta seção descreve a etapa inicial do projeto, na qual foram reunidas as informações relevantes sobre o TPC e sua falha, estabelecendo a base para análises posteriores.

2.2.1 Manual de instruções *Trench Eletric*

Para compreender a configuração interna do equipamento e selecionar os dados apropriados para a análise, foi utilizado o manual técnico destinado a transformadores de potencial capacitivo e capacitores de acoplamento, fornecido pela Trench Electric. A Figura 3 apresenta o circuito equivalente do TPC, com destaque para os enrolamentos com múltiplos terminais, que possibilitam o ajuste da amplitude e da defasagem angular da tensão refletida. Para o TPI, os terminais de ajuste acessíveis são os representados pelas letras A, B, C, D, E, F, G, K, L, M, N e, para o reator série, tem-se os pontos L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7 e L8.

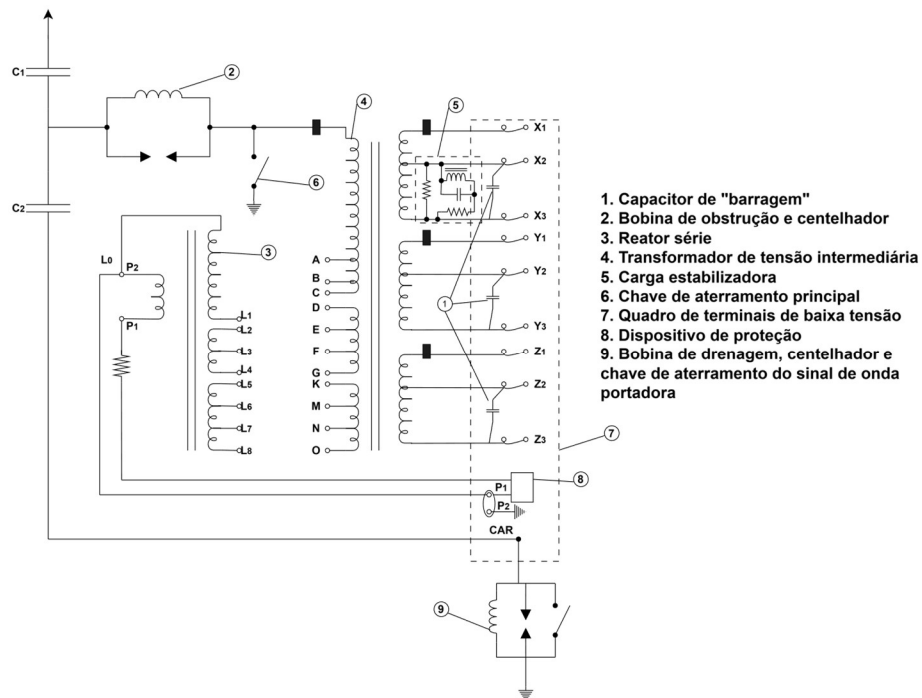


Figura 3. Circuito/diagrama representativo do TPC. Fonte: adaptado de Manual Trench Eletric (1982).

2.2.2 Dados de placa

Os valores nominais do TPC, obtidos em sua placa de identificação, servem como referência para a comparação com os resultados dos ensaios. O equipamento opera com tensão de linha nominal de 345 kV, tensão primária fase-neutro de 207 kV e frequência de 60 Hz. O transformador de potencial capacitivo possui duas relações de transformação: a primeira (X1-X3/Y1-Y3), de 1800:1, com tensão secundária nominal de 115 V, e a segunda (X2-X3/Y2-Y3), de 3000:1, com tensão secundária de 69 V. Adicionalmente, as capacitâncias nominais são $C1 = 6800$ pF, $C2 = 111900$ pF e $CN = 6000$ pF, e a classe de exatidão do equipamento é 0,5. Além dos valores quantitativos, também foi analisado o diagrama de ligação presente na estrutura do TPC. Esse diagrama apresenta uma visão geral das conexões do equipamento, sem detalhar os ajustes de amplitude e ângulo. Ele também indica quais terminais são acessíveis, orientando o planejamento das conexões nos ensaios.

2.2.3 Histórico do equipamento

Durante sua vida útil, o TPC foi submetido a diversos ensaios em manutenções preventivas. Esses registros permitiram a comparação dos valores obtidos em testes recentes com os dados históricos, como os ensaios de resistência ôhmica e de isolamento.

2.2.4 Registros do evento de falha

O TPC foi utilizado exclusivamente no sistema de sincronismo de disjuntores, e, por isso, não havia monitoramento contínuo da tensão em seus terminais secundários. Assim, não foi possível determinar se a falha ocorreu de forma progressiva ou abrupta. O acompanhamento do equipamento teve início após a identificação de uma temperatura anômala na estrutura, detectada por meio de termografia.

2.2.5 Parâmetros de ensaios de óleo mineral

A metodologia e os critérios de avaliação dos ensaios foram baseados nas normas ABNT NBR 7070 e ABNT NBR 10576:2017. Estas normas fornecem os valores de referência para os ensaios classificados como "Grupo 1", considerados suficientes para garantir a operação contínua do equipamento. Ressalta-se, contudo, que os valores de referência utilizados possuem caráter estimativo, uma vez que algumas especificações não são exclusivas para transformadores de instrumento, mas sim para equipamentos que operam em faixas de tensão semelhantes.

Para a análise de gases dissolvidos (AGD), adotaram-se os valores-limite da norma IEEE C57.104 (considerando a relação $O_2/N_2 > 0,2$), sendo os limites em ppm: hidrogênio (40), metano (20), etano (15), etileno (60) e dióxido de carbono (5500). Para a análise físico-química do óleo, os valores-limite de referência e suas respectivas normas são: rigidez dielétrica de 50 kV (ABNT NBR IEC 60156); teor de água de 20 ppm (ABNT NBR 10710); cor 1 (ABNT NBR 14483); índice de neutralização de 0,15 mg KOH/g (ABNT NBR 14448); tensão interfacial de 25 dyn/cm (ABNT NBR 6234); e densidade de 0,85951.

2.3 Inspeção visual

Antes da realização dos ensaios, foi conduzida uma inspeção visual em todas as etapas de desmontagem do equipamento. Inicialmente, buscou-se identificar indícios de falhas nos pontos acessíveis sem a necessidade de desmontagem, verificando-se especialmente a porcelana da coluna capacitiva, possíveis vazamentos de óleo mineral e a caixa de terminais de baixa tensão. Posteriormente, durante e após a remoção da seção capacitiva, foram inspecionados o polímero de vedação entre a coluna e a caixa de base, o óleo mineral nela contido e a condição visual de seus componentes.

2.4 Ensaios e testes diagnósticos

Nesta seção são apresentados os ensaios realizados com o objetivo de identificar as possíveis causas e consequências da falha no equipamento em estudo. Para viabilizar a execução dos testes, são utilizados o terminal de alta tensão, correspondente à entrada da tensão de linha, os terminais disponíveis na caixa de baixa tensão e os terminais de ajuste dos enrolamentos. Inicialmente, foram executados ensaios com o equipamento ainda montado, visando isolar a possível região defeituosa.

2.4.1 Isolação AC da coluna capacitiva pré-desmonte

Com o objetivo de identificar a seção comprometida, foi realizado o ensaio de isolamento AC (corrente alternada) utilizando os terminais externos, direcionado às seções capacitivas C1, C2 e ao conjunto equivalente CN. Para isso, foi empregado o modo de teste GSTg-RB em todas as situações. Este modo é utilizado para mensurar a corrente que retorna à terra, excluindo da medição os valores que fluem pelos próprios cabos de injeção do TRAX (Red e Blue), evitando assim a interferência de trechos indesejados.

A aferição de cada porção do divisor capacitivo exigiu estados específicos das chaves de aterramento e conexões adequadas, mantendo-se sempre o terminal Blue conectado à massa. Para a medição de CN, o terminal Red foi conectado ao terminal de alta tensão (AT), a chave de aterramento *carrier* foi fechada e a chave de aterramento principal, aberta. Para C1, o terminal Red permaneceu no terminal AT, porém a chave *carrier* foi aberta e a principal fechada. Por fim, para a medição de C2, o terminal Red foi conectado ao terminal CAR, mantendo-se a mesma configuração de chaves de C1 (*carrier* aberta e principal fechada).

2.4.2 Relação de transformação do TPC pré-desmonte

O ensaio de relação de transformação consiste na aplicação de tensão em um enrolamento (primário ou secundário) e na subsequente medição no outro. O procedimento requer quatro pontos principais de conexão: dois para a injeção da tensão e dois para sua leitura, além de uma referência de terra comum. Nos testes realizados, a injeção foi aplicada entre o terminal de alta tensão (AT) e a massa, com uma frequência de 60 Hz, enquanto a leitura foi efetuada em todas as combinações dos terminais secundários X e Y.

2.4.3 Resistência de enrolamentos pré-desmonte

Este ensaio consiste na aplicação de corrente contínua nos enrolamentos e na medição da resistência. As conexões foram realizadas de forma independente para cada par de terminais das bobinas: X1-X3, X2-X3, Y1-Y3 e Y2-Y3.

2.4.4 Relação de transformação do TPC pós-desmonte

De modo análogo ao ensaio descrito na sub-subseção 2.4.2, o TRAX foi novamente utilizado, com a diferença de que, após o desmonte, foi possível acessar diretamente o terminal intermediário T (ver Figura

2). Ou seja, o nível de tensão injetado deixa de ser reduzido pela coluna capacitiva, sendo inserido totalmente no TPI.

Adicionalmente, foi empregado um TTR analógico, apesar das limitações impostas por sua faixa de relação (limitada a 130:1) e da ausência de transformador externo. O TRAX foi utilizado com foco na medição da relação de transformação abrangendo todo o enrolamento, enquanto o TTR teve como objetivo identificar possíveis curtos nos terminais de ajuste, caracterizados por valores elevados de corrente.

Assim, no TRAX, foi feita a injeção de corrente entre o Terminal T e a terra e todas as combinações de terminais X e Y, a uma frequência de 60 Hz. No TTR, foi feita a injeção sempre entre os terminais X1-X3 e a leitura foi realizada nos terminais de ajuste do primário do TPI.

2.4.5 Isolação DC dos enrolamentos pós-desmonte

Com a finalidade de identificar curtos-circuitos na caixa de base, foi aplicado o ensaio de isolação em corrente contínua (CC). O teste consistiu na medição da isolação entre múltiplos pares de pontos: o enrolamento primário em relação a terra e aos terminais X-Y (curto-circuitados); a terra em relação aos terminais X-Y (curto-circuitados); e entre os terminais X e Y. Adicionalmente, foi verificada a isolação mútua entre os enrolamentos ABC, DEFG e KMNO (testando ABC-DEFG, ABC-KMNO e KMNO-DEFG).

2.4.6 Resistência dos enrolamentos pós-desmonte

A desmontagem do equipamento permitiu o acesso direto aos terminais de ajuste do reator série e do transformador intermediário. Assim, foi possível medir a resistência de cada seção de forma isolada, permitindo identificar eventuais curtos internos ou desequilíbrios, além de realizar uma análise preliminar da isolação entre os enrolamentos. A Figura 4 apresenta os pontos de conexão acessíveis dessas seções.

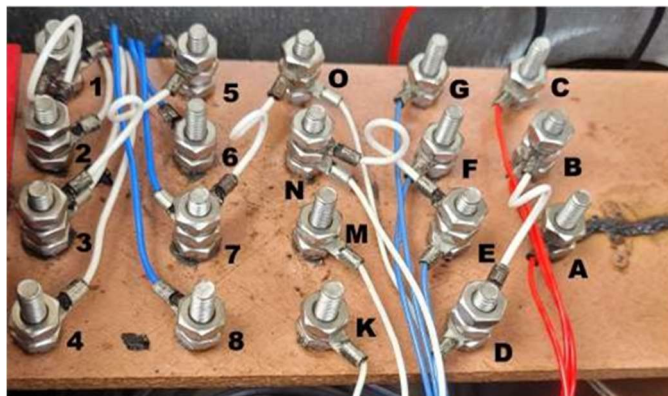


Figura 4. Terminais *taps* do reator e TPI.

2.4.7 Ensaio no óleo mineral pós-desmonte

Os ensaios seguiram os parâmetros definidos pelas normas específicas de coleta, manuseio e análise de óleo isolante.

2.5 Modelagem e simulação computacional

A simulação desenvolvida no MATLAB R2013b®, por meio da ferramenta *Simulink*, foi implementada com o objetivo de complementar a análise experimental, permitindo a realização de testes com o TPC tanto em condições normais quanto em situações de falha. Dessa forma, torna-se possível validar hipóteses e analisar o comportamento do equipamento diante de diferentes condições operacionais.

2.5.1 Ambiente de simulação

Foi adotado o *Simulink* devido à *toolbox Simscape Electrical*, a qual possibilita uma simulação eficiente de sistemas elétricos, considerando fenômenos transitórios, bem como características como saturação e histerese.

Para viabilizar a simulação, utilizou-se o bloco *Solver Configuration*, responsável por definir a resolução das equações do *Simscape* — mantido com as configurações padrão — e o bloco *powergui*, necessário para parametrizar a simulação, configurado no modo *Continuous*, também mantendo os demais parâmetros como padrão.

2.5.2 Modelagem do TPC

A modelagem do TPC foi construída no *Simulink* com a inserção dos componentes que representam as partes do equipamento. Inicialmente, foi inserida uma fonte de tensão em série com uma resistência e uma indutância, representando a impedância de uma linha de transmissão de 100 MVA de potência e tensão de 345 kV. Em paralelo a esses elementos, tem-se o divisor capacitivo formado pelos capacitores C1 e C2, com valores conforme especificado na placa do equipamento, sendo responsável por regular a tensão que atinge o transformador de potencial intermediário.

Conectado à extremidade de C2 estão os acessórios do circuito *carrier*. Este trecho é composto por um bloco *Breaker*, representando a chave de aterramento, um *Parallel RLC Branch* com componente indutivo, e um bloco centelhador customizado, que será descrito posteriormente. Todos os elementos são ligados a um mesmo ponto de referência de terra.

Entre o ponto de tensão intermediária — fornecido pelo divisor capacitivo — e o transformador de potencial indutivo, há um bloco centelhador customizado em paralelo com outro indutor, modelado novamente com o *Parallel RLC Branch*.

A modelagem do primário do TPC é finalizada com a inserção do transformador de potencial indutivo, utilizando o bloco *Multi Winding Transformer*, com três enrolamentos no primário e um no secundário. Em série ao primário, foi modelado o reator série, também com o bloco *Multi Winding Transformer*, além de um centelhador conectado a um dos terminais do reator, com ligação a terra.

No secundário do TPC, foi implementado o filtro supressor de ferromagnetismo, composto por um *Series RLC Branch* resistivo em paralelo com outro ramo resistivo, este em série com um reator modelado como *Multi Winding Transformer* com o secundário em aberto.

Diante das limitações do *Simscape Electrical* para simular o comportamento de um centelhador — que permite a condução de corrente quando a rigidez dielétrica é superada — foi desenvolvido um subsistema, cujo funcionamento consiste na leitura da tensão, aplicação do módulo e comparação com o valor de referência. Se o pico for superior ao limite, o *Breaker* é acionado, fechando o circuito.

2.5.3 Parâmetros e limitações do modelo

Devido à indisponibilidade de ferramentas adequadas para medições seguras e precisas, não foi possível obter todos os parâmetros do TPC. Assim, os dados acessíveis foram utilizados de forma fiel na construção do modelo, enquanto os demais componentes foram parametrizados por meio de testes e ajustes sucessivos, visando equilibrar as impedâncias e garantir o funcionamento esperado do equipamento.

Deve-se considerar também que os testes aplicados no modelo foram feitos especificamente para a falha do equipamento em questão. Dessa forma, não foram realizadas medições a fim de confirmar a assertividade da simulação para os parâmetros de comunicação em alta frequência, supressão de harmônicos e transitórios.

2.5.4 Cenários de simulação

Esta seção apresenta os cenários de simulação adotados no desenvolvimento da pesquisa. Considerando que a falha no equipamento apresenta indícios de estar relacionada, principalmente, a um curto-circuito na bobina do primário do transformador, e tendo em vista as limitações discutidas na subseção 2.5.3, a simulação foi conduzida com o objetivo de representar, inicialmente, o funcionamento do equipamento em condições normais e, posteriormente, seu comportamento em condição de falha. Para isso, foram definidos dois cenários principais:

- Operação Normal: uma simulação do TPC em condições normais de funcionamento, refletindo o nível de tensão fornecida pela linha no secundário do transformador com amplitude reduzida.
- Condição de Falha: simulação que visa principalmente apresentar a falha e os impactos que ela causa no funcionamento e equilíbrio do circuito como um todo e principalmente na forma de onda que é refletida no secundário do TPC.

2.5.5 Coleta dos dados da simulação

As principais ferramentas utilizadas para a coleta de dados na simulação consistem nos blocos *Voltage Measurement*, que realiza a leitura da forma de onda da tensão entre dois pontos; *Phase Extractor*, que permite a medição do ângulo de fase da tensão; e *Current Measurement*, destinado à medição da corrente elétrica no circuito. Em conjunto com esses blocos, utilizam-se o *Scope*, que permite a visualização gráfica das formas de onda, e o *Display*, que apresenta valores numéricos em tempo real. Essa estrutura viabiliza a comparação e avaliação do desempenho da modelagem, considerando que a principal função do transformador de potencial capacitivo é refletir, com a maior fidelidade possível, a tensão aplicada em seu terminal de alta tensão.

3 Resultados e discussões

Para a análise da falha do TPC e a identificação das informações necessárias à sua compreensão, os resultados dos procedimentos realizados são apresentados individualmente. Com base nos valores obtidos nos ensaios e no histórico do equipamento, é possível avaliar as prováveis causas e consequências da falha. Deve-se considerar, ainda, o tempo de operação do equipamento — iniciado em 1989 — o que naturalmente implica em variações nos parâmetros em função do desgaste.

3.1 Análise e discussão da inspeção visual

Antes do desmonte do TPC, não foi possível detectar externamente nenhuma causa ou consequência visível da falha. Contudo, especificamente na caixa dos terminais de baixa tensão, detectou-se a presença de dois centelhadores danificados: um entre os pontos P1 e P2, e outro entre X1 e X3.

Um resistor de filme enrolado com a cerâmica quebrada foi encontrado em série com o fusível entre X1 e X3. Entretanto, não foi possível determinar se a quebra ocorreu durante a remoção do equipamento ou se foi consequência da falha.

Após remover a seção capacitiva, mostrada na Figura 5, observou-se que o polímero entre a seção capacitiva e a caixa de base estava desgastado e havia perdido suas características de vedação. Isso permitiu a entrada de umidade na caixa de base, formando uma mistura de água e óleo isolante. Adicionalmente, uma inspeção visual detalhada da parte interna da caixa de base foi realizada, examinando cada componente individualmente. Nessa inspeção, foram detectadas possíveis carbonizações no resistor conectado ao reator série e na porção do papel do TPI próxima à conexão do terminal CAR, que deriva da coluna capacitiva.

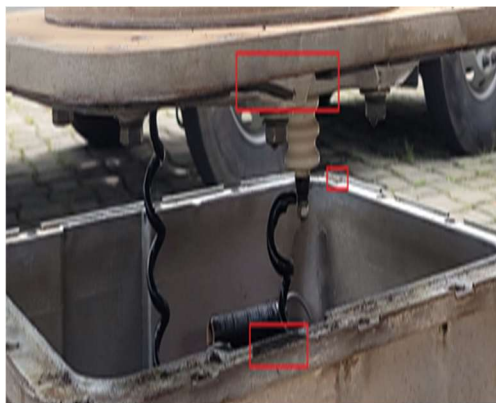


Figura 5. Polímero de vedação da caixa de base danificado.

O ponto de destaque na inspeção visual é a trilha formada na placa de conexões do TPC, ilustrada na Figura 6. Após mapear as conexões de cada parte do equipamento, constatou-se que a trilha se formou entre o ponto de tensão intermediário T, mostrado na Figura 2, e o primeiro terminal de ajuste de amplitude do TPI.

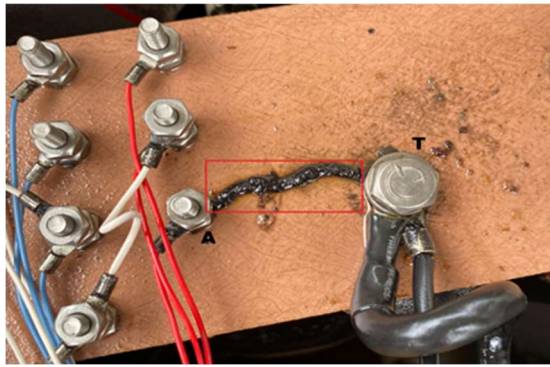


Figura 6. Curto-circuito no primário do TPI.

3.2 Análise e discussão do ensaio de isolamento AC da coluna capacitiva

A Tabela 1 apresenta os resultados detalhados do ensaio de isolamento AC para as capacitâncias C_1 , C_2 e C_N . Observa-se que o fator de dissipação ($\tan \delta$) de C_N é elevado (20,14%) em comparação com os valores de C_1 (0,254%) e C_2 (0,453%). Sabendo que o fator de dissipação pode ser influenciado pela qualidade das conexões durante o ensaio e que os valores de C_1 e C_2 são satisfatórios (valores mais próximos de zero indicam menor dissipação de energia), a alteração em C_N é provavelmente um reflexo da condição de ensaio, não uma falha interna do componente.

Tabela 1. Resultados do ensaio de isolamento AC.

Parâmetro	C_N	C_1	C_2
Tensão (kV)	10,01	10,00	0,2492
Corrente (mA)	27,16	25,79	10,66
Capacitância (pF)	7.058	6.839	113.500
$\tan \delta$ a 0 °C (%)	20,14	0,254	0,453
Potência a 0 °C (W)	53,67	$656,2 \times 10^{-3}$	$12,04 \times 10^{-3}$

Ao analisar a coluna capacitiva, os resultados dos ensaios de isolamento AC fornecem importantes indícios sobre suas condições. Variações nesses ensaios podem apontar para falhas em alguns dos capacitores que a compõem.

A Tabela 2 compara os valores de capacitância medidos com os valores de referência de placa. Embora as variações percentuais de 0,57% para C_1 e 1,41% para C_2 possam indicar possíveis anomalias internas, essas alterações, por si só, não causariam a tensão nula no secundário. A tensão no terminal T é proporcional aos valores de C_1 e C_2 , conforme evidenciado pela Eq. 1. Portanto, descarta-se a possibilidade de a principal falha ser na coluna capacitiva.

Tabela 2. Isolação AC: valores medidos \times valores de referência.

Capacitância	C Medido (pF)	C de Placa (pF)	Erro de C (%)	$\tan \delta$ a 0 °C (%)
C_N	7.058	6.000	14,99	20,14
C_1	6.839	6.800	0,57	0,254
C_2	113.500	111.900	1,41	0,453

3.3 Análise e discussão do ensaio de isolamento DC dos enrolamentos

Os resultados do ensaio de isolamento DC apresentaram os seguintes valores de resistência de isolamento medida e tensão aplicada, respectivamente: entre enrolamento primário e X-Y curto-circuitados, 109 M Ω (500 V); entre enrolamento primário e terra, 98,1 M Ω (500 V); entre terra e X-Y curto-circuitados, 9,67 M Ω (250 V); entre enrolamento ABC e enrolamento DEFG, 630 M Ω (250 V); entre enrolamento ABC e enrolamento KMNO, 620 M Ω (250 V); entre enrolamento KMNO e enrolamento DEFG, 515 M Ω (250 V); e entre X e Y, 26 M Ω (250 V).

Como todas as resistências obtidas estão na faixa de M Ω , indicando um alto nível de isolamento, conclui-se que a falha do equipamento não está ligada a um curto-circuito entre os enrolamentos ou entre os enrolamentos e a carcaça. A Tabela 3 reforça essa conclusão, evidenciando a ausência de curtos-circuitos. Ao comparar o valor de referência do ensaio nos terminais X–Y com os resultados medidos neste trabalho,

a integridade do isolamento é confirmada. Para os demais pontos, mesmo sem valores de referência e considerando que o ensaio foi realizado na ausência do óleo isolante — uma condição que tende a reduzir a resistência de isolamento —, os valores registrados são considerados satisfatórios, não apresentando qualquer indício de curto-circuito.

Tabela 3. Isolação DC: valores medidos × valores de referência.

Ponto 1	Ponto 2	Relação de Transformação	Resistência de Referência Média (MΩ)
Enr. Primário	X-Y curto circuitados	109	-
Enr. Primário	Terra	98,1	-
Terra	X-Y curto circuitados	9,67	-
Enr. ABC	Enr. DEFG	630	-
Enr. ABC	Enr. KMNO	620	-
Enr. KMNO	Enr. DEFG	515	-
X	Y	2.000	686,67

3.4 Análise e discussão do ensaio de relação de transformação

As medições de relação de transformação realizadas antes do desmonte do equipamento revelaram valores significativamente fora das condições de normalidade. Ao aplicar tensão no primário e medir nos secundários, as relações de transformação obtidas estão apresentadas na Tabela 4, que inclui dois testes distintos para cada ponto. Observa-se que tanto os valores da relação de transformação quanto os erros de fase estão distantes dos parâmetros esperados, conforme será discutido na sub-subseção 3.4.4. Além disso, a instabilidade dos resultados é evidente na comparação entre o Teste 1 e o Teste 2 para os pontos X1-X2, que demonstra uma variação superior a 3000 unidades na relação de transformação. Tais resultados destacam a condição instável e imprevisível de operação do equipamento.

Tabela 4. Medições de relação de transformação pré-desmonte.

Pontos	Teste	Tensão Aplicada (V)	Relação de Transformação Medida	Erro de fase (°)	Polaridade	Corrente (mA)
X1-X2	1	1.000	27.563	43,2	Avanço	3,818
X1-X3	1	1.000	10.918	43,7	Avanço	3,859
X2-X3	1	1.000	18.078	44	Avanço	3,830
Y1-Y2	1	1.000	28.097	42,6	Avanço	3,754
Y1-Y3	1	972,2	11.180	42,9	Avanço	3,699
Y2-Y3	1	1.000	17.977	44,1	Avanço	3,877
X1-X2	2	1.000	30.790	41,4	Avanço	3,718
X1-X3	2	1.000	12.604	41,2	Avanço	3,694
X2-X3	2	1.000	20.645	41,5	Avanço	3,705
Y1-Y2	2	1.000	29.957	42,5	Avanço	3,779
Y1-Y3	2	1.000	12.231	41,7	Avanço	3,748
Y2-Y3	2	1.000	20.069	42,6	Avanço	3,786

Após a remoção da coluna capacitiva, o ensaio de relação de transformação foi repetido. Os resultados obtidos foram similares aos realizados com a coluna capacitiva conectada, sugerindo que o problema principal do equipamento provavelmente não está no divisor capacitivo. Na Tabela 5, pode-se observar que os resultados ainda estão fora do padrão de normalidade, mas com valores reduzidos devido à diferença de tensão que chega ao primário do TPI, causada pela remoção da divisão capacitiva. Isso fez com que toda a tensão do ensaio fosse injetada diretamente no TPI, reduzindo a relação de transformação.

Tabela 5. Medições de relação de transformação pós-desmonte.

Pontos	Tensão Aplicada (V)	Relação de Transformação Medida	Erro de fase (°)	Polaridade	Corrente (mA)
X1-X2	1.000	9.093	64,2	Avançar	46,950
X1-X3	1.000	8.669	62,5	Avançar	46,920
X2-X3	1.000	9.386	61,1	Avançar	46,940
Y1-Y2	1.000	15.806	-70,3	Avançar	46,920
Y1-Y3	1.000	6.293	-70,3	Avançar	46,970
Y2-Y3	1.000	10.540	-70,1	Avançar	46,950

Em seguida, foram realizados ensaios de relação de transformação utilizando o equipamento TTR, com o objetivo de verificar possíveis indícios de curto-circuito nos terminais de ajuste dos TPIs. No entanto, a Tabela 6 apresenta valores definidos para a relação de transformação, descartando a ocorrência de anomalias nos resultados. Isso indica que não havia curto-circuito entre os enrolamentos de ajuste.

Tabela 6. Medições de relação de transformação com TTR pós-desmonte.

Ponto 1	Ponto 2	Relação
X1-X3	A-B	5,430
X1-X3	B-C	5,430
X1-X3	D-E	0,044
X1-X3	E-F	0,044
X1-X3	F-G	0,130
X1-X3	K-M	0,473
X1-X3	M-N	0,473
X1-X3	N-O	1,415

Na subseção 3.1.2 foi apresentado um possível curto-circuito na bobina do primário do TPI, o que pode indicar a causa principal das falhas no equipamento. Portanto, foi feita a remoção do material acumulado que formou o curto-circuito e, em seguida, o ensaio de relação de transformação foi realizado novamente para analisar o comportamento do equipamento sem essa deformidade. Após esse processo, o resultado obtido aproximou-se dos valores de normalidade do equipamento, considerando os desgastes devido aos aproximadamente 36 anos de operação. Estes valores de relação mais próximos da normalidade podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7. Medições de relação de transformação após a remoção do curto-circuito.

Pontos	Tensão aplicada (V)	Relação medida	Erro de fase (°)	Polaridade	Corrente (mA)	Frequência de teste (Hz)
X1-X2	1.000	254,2	-1,09	Avançar	1,207	60
X1-X3	1.000	101,7	-1,08	Avançar	1,156	60
X2-X3	1.000	169,5	-1,08	Avançar	1,210	60
Y1-Y2	1.000	254,1	-1,08	Avançar	1,213	60
Y1-Y3	1.000	101,7	-1,08	Avançar	1,168	60
Y2-Y3	1.000	169,4	-1,07	Avançar	1,166	60

O ensaio de relação de transformação fornece os valores da relação e o erro de fase angular. A Tabela 8 mostra um erro de relação de transformação elevado para os ensaios realizados pré-desmonte. Em seguida, na Tabela 9, observa-se que os valores da relação de transformação, mesmo após a remoção da carga capacitiva, permanecem elevados em comparação aos valores esperados (obtidos via Eq. 1). Contudo, após a remoção do curto-circuito no primário do TPI, os valores se estabilizam e se aproximam significativamente do esperado, atingindo um erro de relação de transformação de 1,4% em todos os enrolamentos.

Tabela 8. Relação de transformação pré-desmante: valores medidos x valores de referência.

Pontos	Relação de Transformação Média Pré Desmante	Relação de Transformação de Placa	Erro de Relação de Transformação (%)
X1-X2	29.176,5	-	-
X1-X3	11.761	1.800	553,4
X2-X3	19.361,5	3.000	545,4
Y1-Y2	29.027	-	-
Y1-Y3	11.705,5	1.800	550,3
Y2-Y3	19.023	3.000	534,1

Tabela 9. Relação de transformação pós-desmante: valores medidos x valores de referência.

Pontos	Relação de Transformação Pós Desmante	Relação de Transformação Sem Curto	Valor Esperado	Erro de Relação de Transformação Sem Curto (%)
X1-X2	9.093	254,2	257,8	1,4
X1-X3	8.669	101,7	103,1	1,4
X2-X3	9.386	169,5	171,9	1,4
Y1-Y2	15.806	254,1	257,8	1,4
Y1-Y3	6.293	101,7	103,1	1,4
Y2-Y3	10.540	169,4	171,9	1,4

Além do ajuste na relação de transformação após a remoção do curto-circuito, a melhora no desempenho do equipamento também é notável através da comparação dos valores de erro de fase. A Tabela 10 corrobora os resultados da relação de transformação. Ao comparar os resultados pré-desmante e pós-desmante com os valores após a remoção do curto-circuito, percebe-se que os valores se tornam muito mais estáveis, girando em torno de -1° , um valor dentro dos parâmetros esperados para este equipamento.

Tabela 10. Erro de fase ($^\circ$): valores medidos x valores de referência.

Pontos	Erro de fase ($^\circ$) Média Pré Desmante	Erro de fase ($^\circ$) Pós Desmante	Erro de fase ($^\circ$) Sem Curto
X1-X2	42,3	64,2	-1,09
X1-X3	42,45	62,5	-1,08
X2-X3	42,75	61,1	-1,08
Y1-Y2	42,55	-70,3	-1,08
Y1-Y3	42,3	-70,3	-1,08
Y2-Y3	43,35	-70,1	-1,07

Comparando os valores dos ensaios realizados antes da remoção do provável curto circuito no primário do TPI com os valores de relação de transformação obtidos após a remoção do curto, tem-se um forte indício de que a principal falha que causou a tensão nula no secundário do transformador foi um curto circuito entre o início do enrolamento do primário do TPI e seu primeiro terminal para ajuste de amplitude. Dessa forma, de acordo com o manual do equipamento, que fornece a correspondência percentual da seção dos enrolamentos do TPI e do reator série, esse curto compromete cerca de 89% do enrolamento do primário do transformador de tensão intermediário.

3.5 Análise e discussão do ensaio de resistência dos enrolamentos

Foi realizada a medição de resistência de cada seção dos enrolamentos acessíveis antes do desmante, especificamente nos terminais referentes aos secundários X e Y. As medições de resistência (corrigidas a 20°C) e suas respectivas estabilidades foram: $42,92\text{ m}\Omega$ (99,99%) para os pontos X1-X3; $24,37\text{ m}\Omega$ (99,95%) para X2-X3; $42,94\text{ m}\Omega$ para Y1-Y3; e $25,02\text{ m}\Omega$ (99,95%) para Y2-Y3. As correntes de teste foram de 1,001 A e 1 A. Neste ensaio, os valores de resistência dos enrolamentos foram considerados equilibrados, ao se comparar os valores obtidos entre os enrolamentos X e Y.

Após o desmante e isolamento da caixa de base do TPC, tornou-se possível acessar os terminais de ajuste do TPI e do reator série. Com isso, foram realizadas medições entre cada terminal de ajuste para

verificar a possível ocorrência de curtos-circuitos que abrangessem trechos dos enrolamentos do TPI e do reator série. As medições nos *taps* do reator e TPI foram realizadas com e sem as conexões de ajuste, o que permitiu verificar a provável inexistência de curto-circuitos nessas bobinas ou entre elas. A exceção foi o curto-circuito principal investigado, entre o terminal T e o terminal A de ajuste do TPI. Como os valores de resistência obtidos foram relativamente maiores que zero para enrolamentos conectados e na faixa de $M\Omega$ para enrolamentos fisicamente desconectados, a possibilidade de um curto entre esses terminais ser a causa principal da falha é descartada.

As variações de resistência dos enrolamentos secundários foram significativas em comparação aos valores de referência históricos, como se observa na Tabela 11. Apesar disso, as medições de resistência mostraram-se coerentes e equilibradas em ambos os enrolamentos secundários do transformador. Uma vez que a relação de transformação é diretamente proporcional ao número de espiras e não à resistência dos enrolamentos, e que os enrolamentos secundários X e Y apresentam variação mínima de resistência entre seus pontos equivalentes, considera-se que a alteração na resistência é decorrente do tempo de operação do equipamento e não afeta seu funcionamento nessa magnitude.

Tabela 11. Resistência de enrolamentos: valores medidos x valores de referência.

Pontos	Resistência Medida ($m\Omega$)	Resistência de Referência ($m\Omega$)	Erro de Resistência (%)
X1-X3	42,92	206,43	79,21
X2-X3	24,37	201,61	87,91
Y1-Y3	42,94	187,14	77,05
Y2-Y3	25,02	167,85	85,09

3.6 Análise e discussão dos ensaios do óleo mineral isolante

O resultado da cromatografia de óleo da caixa de base do TPC indicou: dióxido de carbono com concentração de 2.171,8 ppm, área de 773,9582 u.a. e tempo de retenção de 8,654 min; etileno com 12.915,5 ppm, área 15.851,99 u.a. e tempo 10,092 min; etano com 9.978,9 ppm, área 11.330,77 u.a. e tempo 11,209 min; metano com 220,3 ppm, área 109,685 u.a. e tempo 15,028 min; hidrogênio com 48,7 ppm, área 27,1583 u.a. e tempo 3,429 min; oxigênio com 10.516,1 ppm, área 890,0324 u.a. e tempo 4,466 min; e nitrogênio com 50.905,5 ppm, área 3.309,757 u.a. e tempo 5,234 min.

Por sua vez, os resultados da análise de óleo da caixa de base do TPC apresentaram: rigidez de 20,3 kV; teor de água de 39 ppm; fator de dissipação de 1,8%; cor L2,5; índice de neutralização (acidez) de 0,06 mgKOH/g; tensão interfacial de 27,6 dyn/cm; e densidade de 0,85951. Os resultados dos ensaios realizados no óleo mineral da caixa de base do TPC, apresentados comparativamente com os valores de referência normativa nas Tabelas 12 e 13, revelam anormalidades claras no óleo.

Tabela 12. Cromatografia: valores medidos x valores de referência.

Gás	Referência (ppm)	Ensaiado (ppm)	Quantidade acima da referência
Hidrogênio	40	48,7	8,7
Metano	20	220,3	200,3
Etano	15	9978,9	9963,9
Etileno	60	12915,5	12855,5
Dióxido de Carbono	5500	2171,8	-

Tabela 13. Análise de ensaio de óleo: valores medidos x valores de referência.

Tipo	Valor referência	Valor ensaiado	Unidade
Rigidez	50	20,3	kV
Teor de Água	20	39	ppm
Fator de Perdas Dielétricas	-	1,8	%
Cor	1	L2,5	-
Índice de Neutralização	0,15	0,06	mgKOH/g
Tensão Interfacial	25	27,6	dyn/cm
Densidade	-	0,85951	-

Essas anormalidades no óleo, especialmente o elevado teor de gases, baixa rigidez dielétrica e alto teor de água, criam um ambiente propício para a ocorrência de fenômenos prejudiciais ao circuito do TPC.

Acredita-se que as condições da mistura presente na caixa de base do TPC favoreceram a formação de material particulado, que se aglomerou e causou o curto-circuito na placa dos terminais de saída do TPI. Adicionalmente, essa mistura criou um ambiente que permitiu a ocorrência de pontos quentes resultando na queima de alguns componentes na caixa de base do TPC.

Portanto, a condição inicial de monitoramento do equipamento, motivada por um ponto de temperatura elevada detectada por termografia, confirma a natureza da falha prevista a partir das altas concentrações de gases no óleo mineral, conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 7070.

3.7 Análise da natureza da falha

A interpretação dos ensaios em conjunto com a inspeção visual, permitiu a estimar os critérios propostos pela Análise da Causa Raiz. Acredita-se que a umidade detectada na caixa de base do transformador foi o principal motivo da ocorrência da falha. A presença de umidade no óleo isolante e no isolamento sólido afeta diretamente as características dielétricas do meio. Este ambiente fora das conformidades é propício para o acúmulo de material particulado, que culmina na formação de "trilhas" condutivas, facilitando o surgimento de descargas elétricas no material isolante. Assim, a umidade contribuiu para o surgimento da "trilha" na placa de conexões da caixa de base, transformando-a em um curto-circuito de baixa impedância entre pontos do primário do TPI, comprometendo 89% desse enrolamento.

Dessa forma, a tensão nula no secundário do transformador de instrumento estabelece uma característica consistente com um curto circuito severo nos enrolamentos do primário do TPI. Acredita-se que o curto atua reduzindo drasticamente a impedância de entrada no transformador indutivo. Assim, como a circulação de corrente no primário do transformador é afetada, tem-se a alteração das condições de saturação do núcleo e linearidade do transformador, bem como no comportamento do divisor capacitivo. Consequentemente, o fluxo magnético gerado, que não é proporcional ao valor esperado com o bom funcionamento, é baixo e como consequência a tensão induzida nos enrolamentos do secundário também. Portanto, quando os equipamentos de medição fazem a leitura do nível de tensão do secundário e comparam com a tensão inserida no primário, o cálculo da relação de transformação tende ao infinito.

A etapa de ensaios após a remoção do curto circuito foi decisiva. O retorno da relação de transformação para valores próximos ao nominal estabelece uma forte relação causal entre a "trilha" condutiva e a falha do TPC. Isso demonstra que a "trilha" era, de fato, o caminho de curto-circuito que impedia a operação normal do equipamento. Assim, a sucessão dos ensaios realizados antes e após a remoção da "trilha" com fatores controlados foi imprescindível para a determinação da causa da falha.

Em resumo, as evidências convergem para a conclusão de que o curto-circuito presente nos enrolamentos do primário do TPI materializado pela trilha condutiva na placa de conexões foi a causa diretamente relacionada a tensão nula no enrolamento do secundário. Este curto-circuito foi resultado do ambiente propício com baixo isolamento em decorrência da umidade na caixa de base do TPC.

3.8 Resultados da simulação computacional

Na simulação realizada em condição de bom funcionamento, pode-se confirmar a reflexão fiel da tensão do primário em escala reduzida no secundário do TPC, seguindo os valores da relação de transformação nominal estipulados. Assim, a Figura 7 expõe a tensão do secundário do transformador em condições normais, proporcional a tensão primária. Por outro lado, a Figura 8 exhibe a tensão secundária afetada pela falha, representando os efeitos observados no TPC real. Por meio destes gráficos e dos dados extraídos das formas de onda extraídas deles e apresentadas na Tabela 14, é confirmada a capacidade do modelo de replicar as condições da falha, algo fundamental para validar a eficiência e precisão do modelo computacional. Na Tabela 14, a partir dos dados coletados, obtém-se o mesmo comportamento da situação real, em que o equipamento em falha apresenta relação de transformação incoerente com a normalidade e com a remoção do curto-circuito, estes valores voltam a parâmetros de normalidade.

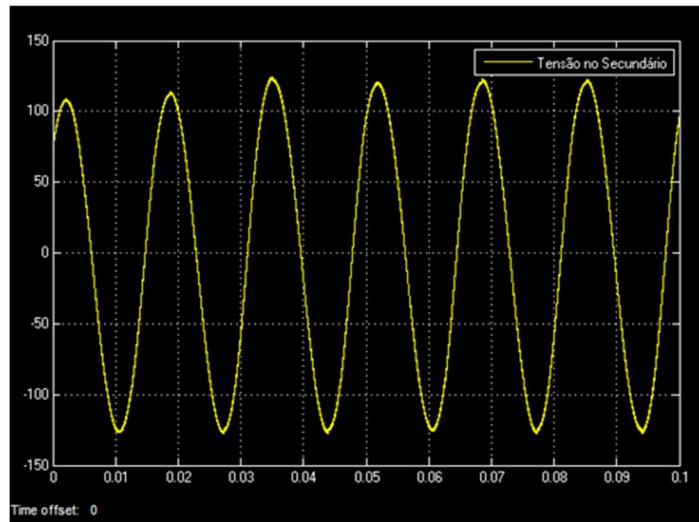


Figura 7. Saída do secundário sem falha - tensão (V) x tempo (s).

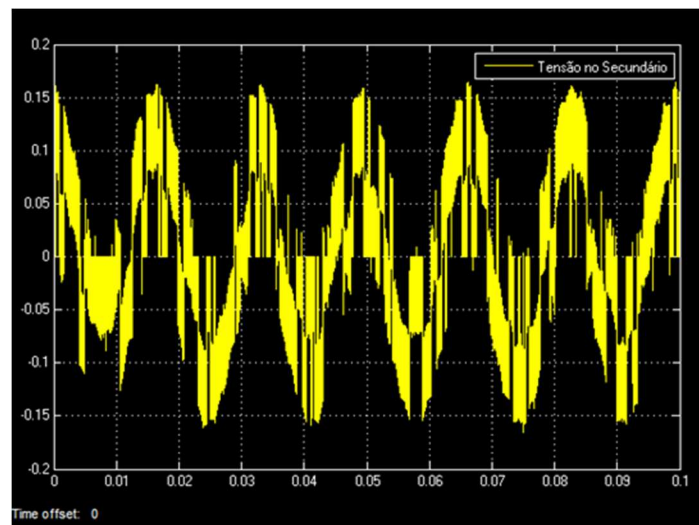


Figura 8. Saída do secundário com falha - tensão (V) x tempo (s).

Tabela 14. Parâmetros da onda de tensão na simulação em regime permanente.

Parâmetros	Com falha	Sem falha
V _{max} Primário (V)	207.000	207.000
V _{max} Secundário (V)	0,08	113,29
Relação de transformação	2.587.500	1.827

Para a condição de falha do equipamento, a simulação de um curto-circuito direto, modelado como um caminho de impedância desprezível, reproduziu a tensão nula no secundário, exatamente como observado em campo.

Conforme evidenciado na Tabela 15, as simulações registraram oscilações anômalas de corrente e tensão no TPC. A tabela apresenta as variações percentuais dos parâmetros em condição de falha, comparando-as com os valores obtidos em operação normal. Observa-se que o curto-circuito no primário do TPI provocou alterações significativas nas correntes e tensões em C1 e C2, resultando na redução da tensão de saída do divisor capacitivo e no aumento da corrente direcionada ao TPI.

Tabela 15. Parâmetros comparativos de componentes da simulação em regime permanente.

Ponto	Com falha	Sem falha	Proporção sem / com falha (%)
V _{max} C1 (V)	207.000	200.047	96,64
V _{max} C2 (V)	132	10433	7.903,79
I _{max} C1 (A)	0,53	0,51	96,23
I _{max} C2 (A)	0,01	0,42	4200
I _{max} - Primário TPI	0,54	0,35	64,81

O curto-circuito retira o equipamento das condições normais de operação, alterando a linearidade do sistema e afetando diretamente a forma de onda da corrente em todo o circuito. Em C2, a forma de onda, que era inicialmente senoidal, passa a se comportar como em um sistema desequilibrado, conforme ilustrado na Figura 9.

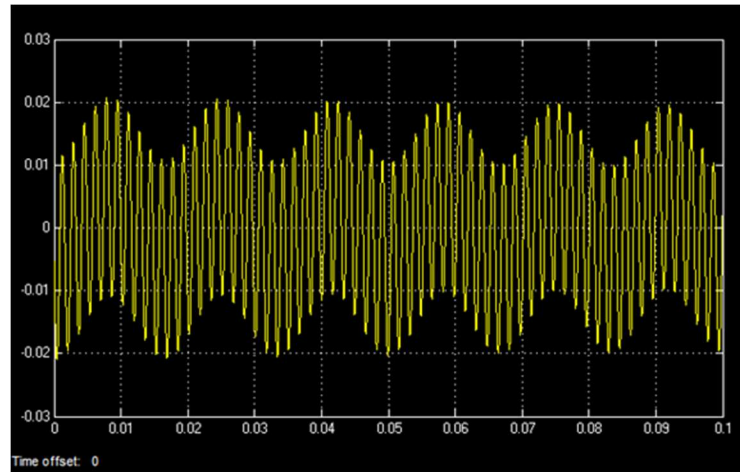


Figura 9. Corrente de C2 com falha - corrente (A) x tempo (s).

Acredita-se que o curto-circuito da maior parte do enrolamento primário do TPI reduz drasticamente sua impedância, transformando-o de uma carga indutiva significativa em uma carga de impedância quase nula. Como o TPI atua como carga do divisor de tensão capacitivo, essa alteração faz com que C2 fique praticamente curto-circuitado. Com isso, a tensão se concentra quase totalmente sobre C1, reduzindo a tensão em C2 para valores muito baixos. Isso compromete a divisão de tensão e desestabiliza o circuito ressonante, originalmente ajustado para operar em ressonância com o reator de sintonia do TPI. A condição de ressonância se rompe, comprometendo a capacidade do TPC de reproduzir corretamente a tensão primária. Dessa forma, a queda de tensão observada em C2, de aproximadamente 10 kV para cerca de 130 V no ponto intermediário do TPC, é uma consequência direta do curto-circuito. Com o primário do TPI em curto, o caminho da corrente se torna de baixíssima impedância, desviando praticamente toda a corrente. Assim, a maior parte da tensão se dissipa em C1 e na impedância da fonte, restando apenas uma fração mínima da tensão no ponto de conexão do TPI.

3.9 Recomendações para mitigação de falhas

Com base na causa raiz identificada (a entrada de umidade na caixa de base do TPC, que contaminou o óleo mineral isolante) e nas consequências da falha, recomenda-se a intensificação das manutenções preventivas e preditivas para essa classe de equipamento. A falha destacou a ligação direta entre as condições do óleo e o surgimento de problemas em TPCs, portanto, sugere-se que a coleta e análise de óleo, como parte integrante da manutenção preventiva, seja intensificada para mitigar a ocorrência de falhas semelhantes.

Adicionalmente, dado o papel essencial do equipamento de refletir a tensão do primário, a realização de ensaios de relação de transformação a cada seis anos, durante as manutenções preventivas, é recomendada. Isso permitiria monitorar o bom funcionamento do TPC e detectar precocemente possíveis indícios de falha.

4 Conclusões

Este estudo teve como objetivo principal investigar as prováveis causas e consequências de um curto-circuito no enrolamento do primário do transformador de tensão intermediário presente em um transformador de potencial capacitivo (TPC) de 345 kV, e modelar sua falha. Para isso, foi utilizada uma metodologia que combinou uma revisão bibliográfica aprofundada, ensaios para determinar a falha e a modelagem no ambiente *MATLAB/Simulink*[®] com a biblioteca *Simscape Electrical*.

O estudo constatou que a deterioração do polímero de vedação entre a caixa de base e a coluna capacitiva, devido ao tempo prolongado de operação, causou a entrada de água. Essa água, misturada ao

óleo mineral, permitiu a formação de uma trilha condutiva que resultou no curto-circuito, distorcendo as características de operação do TPC.

A modelagem empregada permitiu a simulação do funcionamento do transformador de potencial de forma fiel e satisfatória, tanto na condição de bom funcionamento quanto em falha. Em situação de falha, a simulação apresentou a distorção imediata da tensão de saída do TPC e de diversos componentes do circuito, mostrando a grave consequência que um curto-circuito de 89% do enrolamento primário do TPI presente em um TPC pode causar, alterando as condições de operação e saindo de condições lineares. Dessa forma, a modelagem permitiu replicar, compreender e quantificar as causas e consequências da falha.

Este estudo auxiliou na melhoria do diagnóstico de falhas, proporcionando o conhecimento do comportamento do equipamento na condição de falha dentro dos critérios abordados e permitindo o teste e a avaliação de futuras falhas em transformadores de potencial capacitivo. As informações obtidas sobre as falhas contribuem para a manutenção preditiva, reduzindo custos e interrupções não planejadas.

Entretanto, apesar de o estudo obter resultados robustos, o modelo possui simplificações e parâmetros que foram estimados por meio de ajustes sucessivos devido às limitações de ferramentas para dimensionamento e à indisponibilidade de dados internos detalhados do TPC específico. Portanto, algumas simplificações foram adotadas para garantir a viabilidade da simulação, e devem ser consideradas para que o modelo represente com maior fidelidade as condições reais.

Referências bibliográficas

ANEEL (2020) *Resolução Normativa ANEEL n° 906, de 8 de dezembro de 2020*. Brasília. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020906.pdf> (Acesso em: 9 abril 2025).

ANEEL (2022) *Resolução Normativa ANEEL n° 1001, de 18 de janeiro de 2022*. Brasília. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20221001.pdf> (Acesso em: 28 setembro 2024).

Aquino, R.M. e Vale, M.H.M. (2009) ‘*Impacto da parcela variável na expansão, operação e manutenção do sistema interligado nacional – propostas para atualização de procedimentos*’, in XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Recife, PE, 22–25 novembro.

Bing, Y., Zhi, Y., Luyao, Z., Lin, Z., Haofan, L. and Yang, Y. (2021) ‘*Analysis report of A phase CVT fault in 220 kV auxiliary section I of 500 kV substation*’, in 2021 6th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM), pp. 376–379. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICICM54364.2021.9660270> (Acesso em: 16 outubro 2024).

Camargo, M.C. (2015) *Metodologia para modelagem de transformadores de potencial indutivos e capacitivos para estudos de transitórios em altas frequências*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Davarpanah, M., Sanaye-Pasand, M. and Badrkhani Ajaei, F. (2012) ‘*CCVT failure due to improper design of auxiliary voltage transformers*’, IEEE Transactions on Power Delivery, 27(1), pp. 391–400. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2171511> (Acesso em: 12 outubro 2024).

Diniz, F.F.M. (2021) *Análise do impacto regulatório quanto à aplicação da parcela variável no serviço público de transmissão de energia elétrica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

Frontin, S.O., Violin, A., Abreu, A.M., Monteiro, A.M., Carvalho, A.C.C., Junior, A.C.P.B., D’Ajuz, A., Alencar, B.M.S.M., Lopes, C.F., Gabaglia, C.P.R., Frate, C., Costa, C.A., Correia, D.M., Resende, F.M., Carvalho, F.M.S., Pinto, J.O.S. and Filho, J.A. (2013) *Equipamentos de alta tensão*. 3. ed. Brasília: EDUTFPR.

He, J., Zhou, Z., Tong, C., Li, F., Rao, F. and Xu, Q. (2023) ‘*Online evaluation method of CVT internal insulation abnormality based on self-supervised learning*’, Energies, 16(12), p. 4585. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16124585> (Acesso em: 6 outubro 2024).

Lachman, M. (2007) *Sistema de monitoração remota e avaliação do estado operativo de transformadores de potencial capacitivo (TPCs) instalados em subestações em operação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Mamede Filho, J. (2013) *Manual de equipamentos elétricos*. Rio de Janeiro: LTC.

- Ouyang, Z., Chen, J., Zhu, S. and Dai, J. (2023) ‘*Analysis of an abnormal secondary voltage accident of capacitive voltage transformer*’, *Journal of Physics: Conference Series*, 2542(1), p. 012015. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2542/1/012015> (Acesso em: 28 setembro 2024).
- Pessanha, J.F.M., Mello, M.A.R.F., Barros, M. and Souza, R.C. (2010) ‘*Avaliação dos custos operacionais eficientes das empresas de transmissão do setor elétrico brasileiro: uma proposta de adaptação do modelo DEA adotado pela ANEEL*’, *Pesquisa Operacional*, 30, pp. 521–545.
- Pires, J.C.L., Giambiagi, F. and Sales, A.F. (2002) *As perspectivas do setor elétrico após o racionamento. Texto para Discussão n. 97*. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).
- Sweetana Jr., A. and Flugum, R.W. (1966) ‘*A new metering accuracy capacitive potential device*’, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 85(5), pp. 499–510.
- Trench Electric (1982) *Manual de instruções para transformadores de potencial capacitivos e capacitores de acoplamento*. Boletim IM300-05P. Trench Electric.
- Xuan, H., Wen, C., Song, Y. and Wei, X. (2020) ‘*Fault detection and analysis of capacitive components of capacitive voltage transformer*’, *E3S Web of Conferences*, 218, p. 01001.
- Zhou, Z., Cai, C., Zhu, H., Yang, X., Wu, F. and Liu, H. (2016) ‘*Test and diagnosis on a secondary voltage loss fault of a 220 kV capacitor voltage transformer*’, in *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, pp. 1–4. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2016.7800879> (Acesso em: 16 agosto 2024).