REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE ENSAIOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADOR DE 300 kVA: AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS E DIAGNÓSTICO

ANALYSIS OF ELECTRICAL TESTS ON A 300 kVA TRANSFORMER: PARAMETER EVALUATION AND DIAGNOSIS

ANÁLISIS DE ENSAYOS ELÉCTRICOS EN UN TRANSFORMADOR DE 300 kVA: EVALUACIÓN DE PARÁMETROS Y DIAGNÓSTICO

Kauã Pereira Destro[1], Ronaldo Gomes Figueira[2]

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9632

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

Este artigo analisa resultados de ensaios elétricos realizados em um transformador trifásico de 300 kVA, classe de tensão de 15 kV, com o objetivo de avaliar parâmetros associados aos enrolamentos, ao sistema isolante e ao núcleo magnético. O estudo combina revisão bibliográfica e análise descritiva de registros experimentais de relação de transformação, resistência dos enrolamentos, resistência de isolamento, perdas a vazio, perdas em carga, impedância de curto-circuito e ensaios dielétricos. Nas cinco posições do comutador e nas três fases, o maior desvio da relação de transformação foi de −0,118%, dentro da tolerância de ±0,5% adotada na avaliação. Foram registrados 501 W de perdas a vazio, corrente de excitação de 0,62% e impedância de curto-circuito de 4,48%. As resistências de isolamento medidas foram de 83,7 GΩ entre alta e baixa tensão, 53,8 GΩ entre alta tensão e massa e 42,7 GΩ entre baixa tensão e massa. Os resultados caracterizam o comportamento do transformador nas condições ensaiadas; a confirmação de conformidade para todos os parâmetros depende da explicitação dos respectivos limites técnicos e das condições experimentais. A análise ressalta a importância da rastreabilidade das medições e da interpretação conjunta de diferentes ensaios.

PALAVRAS-CHAVE: Transformadores de distribuição. Ensaios de rotina. Caracterização elétrica. Perdas elétricas. Isolamento elétrico.

ABSTRACT

This article analyzes electrical test results obtained from a 300 kVA three-phase transformer, with a 15 kV voltage class, to assess parameters related to the windings, insulation system, and magnetic core. The study combines a literature review with a descriptive analysis of experimental records covering transformer turns ratio, winding resistance, insulation resistance, no-load losses, load losses, short-circuit impedance, and dielectric tests. Across three phases and five tap-changer positions, the largest turns-ratio deviation was −0.118%, within the ±0.5% tolerance adopted for the analysis. Recorded values included 501 W of no-load losses, 0.62% excitation current, and 4.48% short-circuit impedance.

[1] Universidade de Araraquara (UNIARA). Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara (UNIARA).
[2] Universidade de Araraquara (UNIARA). Associação São Bento de Ensino, CPFL Energia, Cervejarias Kaiser Brasil Ltda, Empresa Paulista de Embalagens Agroindustriais - EPEMA, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial São Paulo, Tetra Pak Ltda, UNIARA, Universidade Cândido Mendes, Universidade Federal de São Carlos Departamento de Matemática.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Insulation resistance measurements were 83.7 GΩ between high- and low-voltage windings, 53.8 GΩ between high voltage and ground, and 42.7 GΩ between low voltage and ground. These results characterize the transformer's behavior under the tested conditions. A definitive compliance assessment for each parameter still requires the applicable technical limits and test conditions to be explicitly documented. The analysis highlights the importance of measurement traceability and the joint interpretation of different tests.

KEYWORDS: *Distribution transformers. Routine tests. Electrical characterization. Electrical losses. Electrical insulation.*

RESUMEN
Este artículo analiza los resultados de ensayos eléctricos efectuados en un transformador trifásico de 300 kVA, de clase de tensión de 15 kV, para evaluar parámetros relacionados con los devanados, el sistema de aislamiento y el núcleo magnético. El estudio combina una revisión bibliográfica y el análisis descriptivo de registros experimentales de relación de transformación, resistencia de devanados, resistencia de aislamiento, pérdidas en vacío, pérdidas en carga, impedancia de cortocircuito y ensayos dieléctricos. En las tres fases y las cinco posiciones del cambiador de tomas, la mayor desviación de la relación de transformación fue de −0,118%, dentro de la tolerancia de ±0,5% adoptada para el análisis. Se registraron 501 W de pérdidas en vacío, una corriente de excitación del 0,62% y una impedancia de cortocircuito del 4,48%. Las resistencias de aislamiento medidas fueron de 83,7 GΩ entre alta y baja tensión, 53,8 GΩ entre alta tensión y tierra y 42,7 GΩ entre baja tensión y tierra. Los resultados caracterizan el comportamiento del transformador en las condiciones ensayadas. La evaluación definitiva de conformidad de cada parámetro requiere documentar los límites técnicos aplicables y las condiciones de ensayo. Se destaca la importancia de la trazabilidad de las mediciones y de su interpretación conjunta.

PALABRAS CLAVE: *Transformadores de distribución. Ensayos de rutina. Caracterización eléctrica. Pérdidas eléctricas. Aislamiento eléctrico.*

1. INTRODUÇÃO

Os transformadores são equipamentos essenciais para a transferência de energia elétrica entre circuitos e para a adequação dos níveis de tensão nos sistemas de distribuição e utilização. Sua confiabilidade depende, entre outros fatores, da integridade dos enrolamentos, do sistema isolante e do núcleo magnético. Por essa razão, os ensaios elétricos são empregados na verificação de parâmetros construtivos e de desempenho, tanto na fabricação quanto na manutenção [1, 2].

A questão que orienta este estudo é: em que medida a interpretação conjunta dos resultados de ensaios elétricos permite avaliar parâmetros de funcionamento de um transformador trifásico de 300 kVA e apontar eventuais irregularidades?

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

O objetivo geral é analisar resultados de ensaios elétricos realizados em um transformador trifásico de 300 kVA, relacionando as grandezas medidas aos componentes avaliados e aos critérios de comparação disponíveis.

A justificativa do estudo reside na necessidade de apresentar dados experimentais rastreáveis e discutir seu significado técnico. A leitura isolada de uma medição não caracteriza necessariamente uma falha; sua interpretação depende das condições de execução, das características do equipamento e dos valores de referência aplicáveis [3].

A investigação concentra-se nos ensaios de relação de transformação, resistência dos enrolamentos, resistência de isolamento, perdas a vazio, perdas em carga e impedância, tensão induzida e tensão suportável à frequência industrial. O artigo descreve as medições disponíveis e diferencia a avaliação de conformidade fundamentada de indicações que ainda requerem documentação complementar.

1.1. Objetivos específicos

a) Descrever o transformador e os instrumentos empregados nos ensaios;

b) Apresentar os procedimentos e os parâmetros registrados em cada ensaio;

c) Calcular e interpretar diferenças entre medições, destacando limitações e critérios de avaliação;

d) Discutir a contribuição conjunta dos ensaios para a avaliação das condições elétricas do equipamento.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Transformadores transferem energia elétrica entre circuitos por indução eletromagnética, possibilitando a adequação dos níveis de tensão. Núcleo, enrolamentos, buchas e materiais isolantes integram o sistema eletromagnético e dielétrico do equipamento. A condição desses componentes influencia seu desempenho e sua confiabilidade operacional [3, 4].

A avaliação de um transformador não deve se restringir à inspeção visual. Ensaios elétricos permitem observar parâmetros associados à relação de espiras, à continuidade elétrica dos enrolamentos, à integridade da isolação e às perdas e à impedância do equipamento [1, 2].

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

A temperatura, a configuração das ligações, a posição do comutador e as características do sistema de medição podem influenciar os resultados. Consequentemente, a interpretação exige registrar as condições de ensaio e comparar as leituras com os critérios apropriados ao projeto e à norma aplicável [1].

2.1. Medição da relação de transformação

O ensaio de relação de transformação verifica a coerência entre a relação medida e a prevista para cada posição do comutador. Desvios podem decorrer de ligações incorretas, problemas no comutador ou alterações nos enrolamentos. A avaliação deve considerar a configuração vetorial e os valores esperados em cada derivação [1, 5].

2.2. Resistência dos enrolamentos

A medição de resistência ôhmica dos enrolamentos utiliza corrente contínua para caracterizar a resistência elétrica entre terminais. Diferenças entre medições devem ser interpretadas à luz da topologia de conexão, das condições de contato e da temperatura, que altera a resistividade dos condutores [1].

2.3. Resistência de isolamento

A resistência de isolamento é obtida mediante aplicação de tensão contínua entre conjuntos de terminais e partes aterradas. O resultado pode ser influenciado por umidade, temperatura, contaminação e características do sistema isolante; portanto, um valor elevado não substitui a comparação com procedimentos e referências pertinentes [2].

2.4. Ensaio de perdas a vazio

No ensaio em vazio, um enrolamento é alimentado à frequência e à tensão determinadas, mantendo-se o outro sem carga. A potência absorvida relaciona-se predominantemente às perdas no núcleo e a corrente de excitação reflete o comportamento de magnetização do equipamento [1, 5].

Como o circuito magnético apresenta comportamento não linear, a corrente de excitação pode ser distorcida mesmo sob tensão aproximadamente senoidal. A análise dos resultados requer a tensão de ensaio, a frequência, as grandezas registradas e o valor de referência de perdas para o projeto.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

2.5. Ensaio de perdas em carga e impedância

No ensaio em curto-circuito, aplica-se tensão reduzida para fazer circular corrente controlada pelos enrolamentos. A potência medida é usada na determinação das perdas sob carga e a relação entre tensão e corrente permite obter a impedância de curto-circuito, considerando as correções necessárias [1, 5].

2.6. Ensaio de tensão induzida

O ensaio de tensão induzida submete a isolação dos enrolamentos a uma solicitação elétrica superior à condição nominal. Utiliza-se frequência adequadamente elevada em conjunto com a tensão de ensaio para evitar saturação excessiva do núcleo; a duração e os níveis aplicáveis dependem do procedimento adotado [2].

2.7. Ensaio de tensão suportável à frequência industrial (ou ensaio de tensão aplicada)

O ensaio de tensão suportável à frequência industrial, também denominado tensão aplicada, avalia a capacidade de suportar uma solicitação dielétrica entre enrolamentos e partes aterradas. A conclusão exige identificação do nível prescrito, duração e condições de ensaio, além da observação de eventuais falhas [2].

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa consiste em estudo de caso descritivo, com fundamentação bibliográfica e análise de registros experimentais de ensaios elétricos de um transformador trifásico de distribuição. Foram utilizados os valores apresentados nos registros dos equipamentos e nas fotografias existentes.

O equipamento estudado é um transformador trifásico de 300 kVA, classe de tensão de 15 kV nos registros e frequência nominal de 60 Hz. A placa de identificação (08/2026) cita a ABNT NBR 5440 e confirma cinco derivações na AT (13.800, 13.200, 12.600, 12.000 e 11.400 V), BT de 380/220 V, grupo vetorial Dyn1 (AT em delta e BT em estrela com neutro), impedância declarada de 4,48%, enrolamentos de alumínio, eficiência C e elevações de temperatura de 60 °C (óleo) e 65 °C (enrolamentos). Também informa 251 L de volume e massa total de 1.112 kg. A placa constitui evidência documental dos parâmetros nominais.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

3.1. Instrumentos e sistema de ensaio

Para o ensaio de tensão suportável à frequência industrial, foram informados variador de tensão de 220 V, transformador de ensaio de 30 kVA (220 V/100 kV) e mesa de ensaio.

Para a tensão induzida, foram utilizados gerador de 30 kVA e mesa de ensaio; para as perdas em vazio e em carga, variador de tensão de 240 V e sistema MONITEK 9443 [6].

A relação de transformação foi medida por meio de ratiômetro Megabras TR8703, e a resistência de isolamento, por megôhmetro digital Megabras MD5060x, com faixa de tensão informada de 0,5 kV a 5 kV.

A resistência dos enrolamentos foi registrada com o sistema MONITEK 9920 [6].

As medições são apresentadas com suas unidades e, quando necessário, distinguem-se valores nominais, medidos e corrigidos. A comparação com limites técnicos é feita somente quando um critério de referência é explicitado.

Foram analisadas as seguintes condições registradas: relação de transformação nas cinco derivações e três fases; resistências ôhmicas na temperatura informada de 16,5 °C; resistência de isolamento sob aproximadamente 5 kV durante 60 s; ensaio a vazio com alimentação do lado de baixa tensão a 60 Hz; e ensaio em curto-circuito com correções indicadas pelo sistema de medição. Para ensaios dielétricos, foram utilizados os níveis e frequências registrados no painel e no texto original.

3.2. Procedimentos e parâmetros de avaliação

A análise quantitativa inclui o desvio da relação de transformação, calculado por E(%) = [(Rmedida − Rteórica)/Rteórica] × 100, e a dispersão relativa da resistência ôhmica, calculada por D(%) = [(Rmáx − Rmín)/Rmédia] × 100. A dispersão é um indicador descritivo e não constitui, isoladamente, limite de aprovação.

O enquadramento técnico considera as ABNT NBR 5356-1:2025 e NBR 5356-3:2007 [1, 2], além da IEC 60076-1:2011 como apoio [7]. Para as tolerâncias de ensaio, foi consultada a Tabela 23 da ABNT NBR 5440:2014 [5]: +20% para corrente de excitação, +10% para perdas a vazio, +6% para perdas totais e ±7,5% para impedância de curto-circuito. A placa cita a ABNT NBR 5440, sem especificar a edição, e indica eficiência C, grupo Dyn1, impedância de 4,48% e elevações de temperatura de 60/65 °C. A fotografia da Figura 14 registra os parâmetros cadastrados no sistema de ensaios com base no projeto do equipamento: 1,90% para corrente de excitação, 585 W para perdas a vazio, 3.275 W para perdas totais e 4,50% para impedância.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Conforme confirmação do responsável, as referências de perdas totais e de impedância foram adotadas a 75 °C, mesma temperatura dos resultados corrigidos examinados. A especificação Celesc E-313.0019 [8] é utilizada somente como comparação externa, pois apresenta condições construtivas e térmicas que não são integralmente equivalentes às deste estudo. A consulta à edição de 2014 explicita a origem das tolerâncias aqui adotadas, sem substituir a verificação da edição normativa e dos requisitos contratuais aplicáveis ao equipamento fabricado em 2026.

3.2.1. Medição da relação de transformação

A relação de transformação foi registrada nas três fases e nas cinco posições do comutador. Para as tensões nominais de linha e o grupo Dyn1 confirmado na placa, adotou-se R = (VAT/VBT) × √3. A faixa de ±0,5% apresentada na Tabela 2 corresponde ao critério de comparação inicialmente adotado. A IEC 60076-1:2011 estabelece, para a derivação principal e o primeiro par de enrolamentos, a menor tolerância entre ±0,5% e um décimo da impedância percentual efetiva; para outras derivações, indica ±0,5% da relação de projeto [7]. A maior derivação informada na placa é 13.800 V (posição 1), mas a sua identificação formal como derivação principal e a impedância efetiva nessa condição devem ser verificadas antes de aplicar o critério mais restritivo.

3.2.2. Medição da resistência dos enrolamentos

Foram consideradas três medições na baixa tensão e quinze medições na alta tensão nas cinco posições do comutador. Embora tenham sido registradas quinze medições no enrolamento de alta tensão, distribuídas entre as cinco posições do comutador, a análise quantitativa apresentada neste estudo concentrou-se nas três leituras correspondentes à posição 1 (13.800 V). A temperatura registrada foi de 16,5 °C. As comparações entre leituras são apresentadas com os respectivos pares de terminais, quando esses dados estiverem documentados no registro original; não foi aplicada correção térmica adicional aos valores apresentados.

3.2.3. Medição da resistência de isolamento

As medições foram realizadas entre alta tensão e baixa tensão (AT/BT), alta tensão e massa (AT/massa) e baixa tensão e massa (BT/massa), sob tensão contínua informada de

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

aproximadamente 5 kV durante 60 s.

3.2.4. Determinação das perdas a vazio

O lado de baixa tensão foi alimentado até 380 V à frequência nominal de 60 Hz, com a alta tensão em aberto. O sistema registrou tensão, corrente de excitação e potência absorvida. Os valores finais de 501 W e 0,62% foram obtidos da tela de resultados.

3.2.5. Determinação das perdas em carga e da impedância

O ensaio foi realizado à frequência de 60 Hz com corrente controlada. Foram registrados valores de tensão, corrente e potência antes e depois do processamento do sistema, incluindo cálculos referidos a 75 °C. As categorias de perdas apresentadas pelo equipamento foram mantidas com a nomenclatura original, sem recomposição não documentada das parcelas.

3.2.6. Ensaio de tensão induzida

O ensaio de tensão induzida foi realizado com tensão aproximadamente dupla da nominal na baixa tensão e frequência próxima do dobro da nominal, durante 60 s. Segundo a informação do responsável pela execução, o tempo foi acompanhado por cronômetro, presente nos registros fotográficos. A ABNT NBR 5356-3:2007 [2] e a IEC 60076-3:2013, com emenda de 2018 [9], fornecem o enquadramento para os ensaios dielétricos.

3.2.7. Ensaio de tensão suportável à frequência industrial

Para o ensaio de tensão suportável à frequência industrial, foram utilizados níveis de referência de 34 kV no enrolamento de alta tensão (classe 15 kV) e 10 kV no enrolamento de baixa tensão (classe 1,2 kV), à frequência nominal de 60 Hz, com duração informada de 60 s em cada aplicação. O tempo foi acompanhado por cronômetro, conforme informação do responsável pela execução. Em ambos os ensaios, a sensibilidade limitada do ajuste fino não permitiu estabelecer exatamente a tensão de referência; optou-se pelo ajuste disponível mais próximo acima dela, para evitar aplicar tensão inferior à especificada. As Figuras 2 e 3 registram, respectivamente, 35,2 kV na AT e aproximadamente 10,9 kV na BT. Essa justificativa operacional não substitui a conferência das tolerâncias e demais requisitos da ABNT NBR 5356-3:2007 [2].

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados por ensaio e discutidos a partir das grandezas registradas, das relações físicas pertinentes e dos critérios disponíveis. A interpretação distingue comportamento observado, cálculos derivados e conformidade com parâmetros específicos do projeto. Para corrente de excitação, perdas e impedância, utilizam-se os valores configurados no sistema de ensaios e informados como provenientes do projeto. Para resistência de isolamento, resistência dos enrolamentos e ensaios dielétricos, a ausência de critérios específicos integralmente documentados impede atribuir aprovação normativa automática.

4.1. Ensaio de tensão suportável à frequência industrial

O ensaio de tensão suportável à frequência industrial utilizou como referências 34 kV na alta tensão e 10 kV na baixa tensão, com duração informada de 60 s em cada aplicação e frequência nominal de 60 Hz. O tempo foi acompanhado por um cronômetro durante os testes. Devido à sensibilidade limitada do controle de ajuste fino, o valor de 34 kV não pôde ser fixado exatamente; selecionou-se o ajuste imediatamente superior disponível, evitando uma tensão inferior à referência. A Figura 2 apresenta a leitura pontual de 35,2 kV e 61,0 Hz.

Não foram relatadas descargas disruptivas ou interrupções durante a aplicação. O acompanhamento por cronômetro fundamenta a duração informada de 60 s, que foi confirmada por um responsável pela execução.

Figura 1. Transformador utilizado para a realização do ensaio de tensão aplicada



Fonte: Os autores.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 2. Acompanhamento do ensaio de tensão aplicada em transformador classe 15 kV



Fonte: Os autores.

Na baixa tensão, a Figura 3 indica aproximadamente 10,9 kV, ou 0,9 kV (+9,0%) acima da referência de 10 kV apresentada na Tabela 1. Conforme esclarecido pelo responsável pelo ensaio, essa diferença teve a mesma origem observada na alta tensão: a limitação de sensibilidade do ajuste fino, que levou à seleção do ajuste disponível mais próximo acima da referência. A aplicação teve duração informada de 60 s, acompanhada por cronômetro.

Figura 3. Acompanhamento do ensaio de tensão aplicada na baixa tensão



Fonte: Os autores.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Tabela 1. Configurações aplicadas no ensaio de tensão suportável à frequência industrial

Enrolamento	Tensão de referência	Duração	Frequência	Resultado observado
Alta tensão	34 kV	60 s	60 Hz	Sem falha relatada
Baixa tensão	10 kV	60 s	60 Hz	Sem falha relatada

Fonte: Os autores.

4.2. Ensaio de tensão induzida

O ensaio de tensão induzida foi realizado alimentando a baixa tensão com aproximadamente o dobro da tensão nominal e frequência próxima do dobro da nominal. Considerando 380 V como tensão de linha, foram utilizados 760 V e cerca de 120 Hz como referências. A elevação da frequência reduz o risco de saturação excessiva do núcleo sob tensão ampliada. Segundo o responsável, a aplicação durou 60 s, com controle por cronômetro presente no registro fotográfico.

As leituras apresentadas foram 761 V, 762 V e 776 V, com frequência de 120,3 Hz; as correntes correspondentes foram 13,57 A, 13,67 A e 13,86 A. Em relação a 760 V, os valores de tensão diferem em aproximadamente +0,13%, +0,26% e +2,11%.

Não foram relatadas descargas ou interrupções durante os 60 s informados. O registro do cronômetro e o relato da execução documentam a duração utilizada.

Figura 4. Ligação para o ensaio de tensão induzida



Fonte: Os autores.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 5. Acompanhamento do ensaio de tensão induzida



Fonte: Os autores.

4.3. Ensaio de relação de transformação

O ensaio de relação de transformação contemplou três fases e cinco posições do comutador, totalizando 15 medições. Para as tensões nominais indicadas, foram utilizadas relações teóricas compatíveis com o arranjo delta–estrela, conforme a Equação 1, e comparadas com a tolerância de ±0,5% adotada no estudo. A relação teórica varia de aproximadamente 62,901:1 (Tap 1) a 51,962:1 (Tap 5).

A expressão utilizada para calcular a relação teórica foi:

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

$$\text{Relação} = \frac{\text{Vat}}{\text{Vbt}} \sqrt{3}$$

Equação 1 – Relação de transformação.

- R – relação de transformação teórica;
- VAT – tensão nominal de linha na alta tensão;
- VBT – tensão nominal de linha na baixa tensão.

A avaliação das 15 medições apresentou desvios entre aproximadamente −0,118% e +0,067% em relação às relações teóricas. O maior desvio absoluto ocorreu na fase B do Tap 2 (60,095:1 frente a aproximadamente 60,166:1, correspondente a −0,118%). Todas as leituras atendem à faixa de ±0,5% adotada na Tabela 2. A placa de identificação confirma o grupo vetorial Dyn1 e declara impedância de 4,48%; para utilização da condição de tolerância mais restritiva prevista na IEC 60076-1:2011 [7], ainda deve ser identificada a impedância efetiva da derivação principal. O resultado do ensaio de relação não exclui isoladamente outras falhas internas.

Figura 6. Ligação para o ensaio de relação de transformação



Fonte: Os autores.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 7. Resultado da medição no Tap 1, fase A



Fonte: Os autores.

Tabela 2. Relação de transformação: valores teóricos, limites e medições

Tap	AT (V)	BT (V)	Relação	Mín. (−0,5%)	Máx. (+0,5%)	Fase A	Fase B	Fase C
1	13.800	380	62,901	62,586	63,215	62,943	62,888	62,917
2	13.200	380	60,166	59,865	60,467	60,175	60,095	60,113
3	12.600	380	57,431	57,144	57,718	57,434	57,389	57,414
4	12.000	380	54,696	54,423	54,970	54,719	54,689	54,704
5	11.400	380	51,962	51,702	52,221	51,944	51,901	51,926

Fonte: Os autores.
Nota: os valores teóricos e os limites foram calculados com precisão integral e apresentados com três casas decimais; o erro percentual foi calculado antes do arredondamento.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

4.4. Ensaio de resistência dos enrolamentos

O ensaio de resistência ôhmica dos enrolamentos registrou, na baixa tensão e à temperatura de 16,5 °C, resistências de 2,806 mΩ, 2,784 mΩ e 2,807 mΩ. A amplitude entre o maior e o menor valor foi de 0,023 mΩ, equivalente a 0,82% da média das três leituras. A pequena dispersão sugere proximidade dos valores medidos nessa configuração, sem estabelecer, por si, a conformidade do enrolamento.

No lado de alta tensão, para o Tap 1 (13.800 V), foram considerados 3,961 Ω, 4,014 Ω e 3,988 Ω. A amplitude foi de 0,053 Ω, ou 1,33% da média. Esses percentuais são indicadores descritivos calculados a partir dos valores registrados; a avaliação de aceitação exige conhecer os pares de terminais, as tolerâncias do projeto e eventuais correções de temperatura.

Figura 8. Ligação para o ensaio de resistência dos enrolamentos



Fonte: Os autores.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 9. Resultado do ensaio de resistência dos enrolamentos



Fonte: Os autores.

4.5. Ensaio de resistência de isolamento

A resistência de isolamento foi medida com tensão contínua informada de aproximadamente 5 kV, aplicada durante 60 s. O registro apresenta 83,7 GΩ entre AT/BT, 53,8 GΩ entre AT/massa e 42,7 GΩ entre BT/massa. A maior leitura ocorreu entre os dois conjuntos de enrolamentos.

Os valores são elevados em termos absolutos, mas não permitem concluir isoladamente a conformidade dielétrica do equipamento. A interpretação depende das condições de ensaio, da temperatura, de referências pertinentes e, quando disponíveis, de medições anteriores.

Portanto, os resultados são aqui descritos como medições da resistência do sistema isolante nas três configurações indicadas. A atribuição de um juízo formal de aprovação requer explicitar o critério empregado para cada conexão de ensaio.

Tabela 3. Resultados do ensaio de resistência de isolamento

Pontos de medição	Resistência medida
AT/BT	83,7 GΩ
AT/massa	53,8 GΩ

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Pontos de medição	Resistência medida
BT/massa	42,7 GΩ

Fonte: Os autores.

4.6. Ensaio de perdas a vazio

O ensaio de perdas a vazio foi efetuado alimentando-se a baixa tensão em 380 V e 60 Hz, com a alta tensão em aberto. A Figura 11 registra 501 W de perdas a vazio e corrente de excitação de 0,62%, equivalente a aproximadamente 2,85 A segundo a tela do equipamento. A forma de onda da corrente apresenta distorções associadas ao comportamento não linear da magnetização.

A corrente nominal calculada da baixa tensão é In = 300.000/(√3 × 380) ≈ 455,8 A. Assim, 0,62% dessa corrente corresponde a cerca de 2,83 A, em concordância aproximada com a indicação de 2,85 A. O valor de 501 W de perdas a vazio é 84 W (14,36%) inferior aos 585 W do projeto; a corrente de excitação de 0,62% é 1,28 ponto percentual inferior à referência de 1,90%. Ambos se encontram abaixo dos valores cadastrados no sistema, mesmo antes das tolerâncias adicionais de +10% e +20% indicadas na Tabela 23 da ABNT NBR 5440:2014 [5]. Essa comparação caracteriza atendimento aos parâmetros de projeto adotados, sem dispensar a verificação das condições de ensaio e dos requisitos normativos aplicáveis.

Figura 10. Acompanhamento do ensaio de perdas a vazio

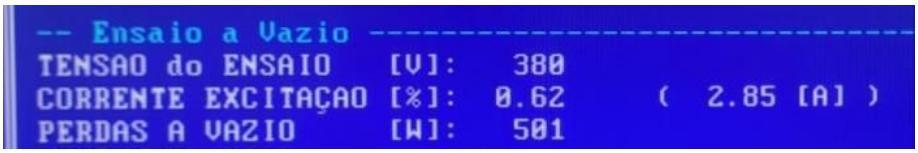


Fonte: Os autores.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 11. Resultado final de perdas a vazio



Fonte: Os autores.

4.7. Ensaio de perdas em carga e impedância

O ensaio de curto-circuito foi realizado à frequência nominal de 60 Hz, com ajuste da corrente. As leituras iniciais registradas foram 595,55 V, 12,15 A e 2.020,09 W; após o processamento do sistema, foram informados 615,25 V, 12,55 A e 2.155,95 W, respectivamente, conforme a Tabela 4. As perdas totais apresentadas pelo sistema, referidas a 75 °C, foram de 3.037 W, valor 238 W (7,27%) inferior à referência de projeto de 3.275 W, estabelecida para a mesma temperatura. A impedância registrada de 4,48%, também referida a 75 °C, difere em −0,02 ponto percentual (−0,44% em termos relativos) do valor de projeto de 4,50%. Aplicando-se a tolerância de ±7,5% indicada na Tabela 23 da ABNT NBR 5440:2014 [5] e no sistema, a faixa de comparação calculada é de 4,1625% a 4,8375%; portanto, o resultado está dentro dessa faixa. Os valores de perdas e impedância são compatíveis com os parâmetros cadastrados para o projeto. A transcrição das leituras na Tabela 4 auxilia a leitura da Figura 13, cujo tipo de caractere utiliza zero cortado; a verificação do laudo original ainda é necessária para a rastreabilidade documental completa.

Tabela 4. Valores iniciais e corrigidos registrados no ensaio em curto-circuito

Grandeza	Leitura inicial	Valor corrigido pelo sistema
Tensão de curto-circuito	595,55 V	615,25 V
Corrente média	12,15 A	12,55 A
Potência ativa total	2.020,09 W	2.155,95 W

Fonte: elaboração própria, com base nos registros textuais do ensaio e na Figura 13.

Referidos à temperatura de 75 °C, os indicadores apresentados pelo sistema foram 2.537 W sob a designação “perdas no cobre”, 3.037 W como “perdas totais”, 346,51 W de

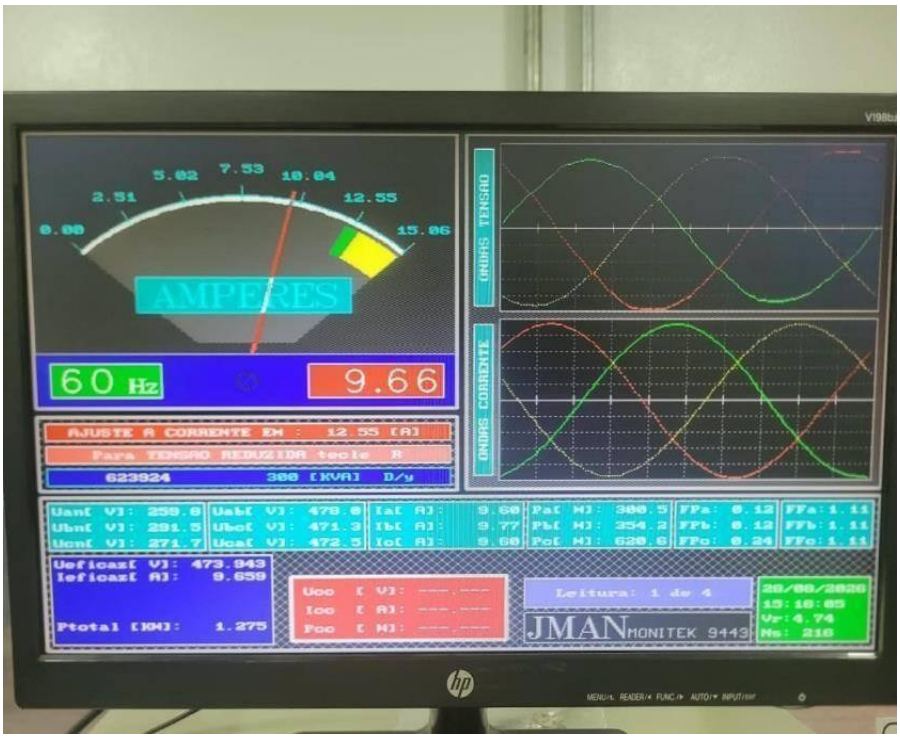
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

“perdas adicionais” e impedância de curto-circuito de 4,48%. O significado e a composição das parcelas de perdas devem seguir as definições do software e do relatório original; não se deduz sua relação por somas entre resultados de ensaios diferentes. Para a derivação de 13.800 V, a corrente nominal teórica é In = 300.000/(√3 × 13.800) ≈ 12,55 A, coerente com o valor corrigido do sistema. A impedância de 4,48% coincide com o valor declarado na placa.

Os limites de projeto e a temperatura de comparação de 75 °C foram esclarecidos posteriormente à análise inicial dos registros e estão documentados pela fotografia do sistema (Figura 14) e pela informação do responsável pela execução. Assim, pode-se avaliar a compatibilidade dos valores de perdas e impedância com os parâmetros configurados para o projeto. Permanecem como limitações a ausência do laudo completo de ensaio e a falta de documentação detalhada do método de correção e da composição das parcelas de perdas utilizadas pelo software; por isso, o atendimento aos parâmetros cadastrados não deve ser confundido com a verificação integral de todos os requisitos normativos e contratuais.

Figura 12. Acompanhamento do ensaio de perdas em carga



Fonte: Os autores.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 13. Resultado do ensaio de perdas em carga



Fonte: Os autores.

4.8. Comparação com os valores de projeto e com uma especificação externa

A Figura 14 apresenta os valores de referência configurados no sistema de ensaios com base no projeto do transformador. A Tabela 5 compara esses parâmetros às leituras experimentais; para perdas totais e impedância, são empregadas as condições de 75 °C confirmadas pelo responsável. Como comparação externa complementar, a Celesc E-313.0019 (2025) [8] apresenta, para transformador trifásico de 300 kVA, classe 15 kV e eficiência C, referências de 585 W para perdas a vazio, 1,90% para corrente de excitação, 3.275 W para perdas totais e 4,50% para impedância. Embora os números coincidam com os cadastrados no projeto, a especificação externa considera três derivações de AT, enquanto o equipamento possui cinco; além disso, para a alternativa construtiva de 60/65 °C, suas perdas totais são referidas a 85 °C, e não a 75 °C. Portanto, a comparação direta de conformidade é feita com os valores do projeto e não com o limite externo de perdas totais.

Figura 14. Valores de referência do projeto registrados no sistema de ensaios



Fonte: registro fotográfico do sistema de ensaios, fornecido pelos autores. Parâmetros do projeto e referência térmica de 75 °C confirmados pelo responsável.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Tabela 5. Comparação entre resultados experimentais e parâmetros cadastrados no projeto do transformador

Grandeza	Resultado do ensaio	Referência do projeto	Diferença / critério
Perdas a vazio	501 W	585 W (+10%)	84 W abaixo (14,36%)
Corrente de excitação	0,62%	1,90% (+20%)	1,28 p.p. abaixo
Perdas totais (75 °C)	3.037 W	3.275 W (+6%)	238 W abaixo (7,27%)
Impedância (75 °C)	4,48%	4,50% (±7,5%)	−0,02 p.p.; dentro da faixa 4,1625%–4,8375%

Fonte: elaboração própria, com base nos registros experimentais e na Figura 14 (parâmetros cadastrados no projeto). Nota: a temperatura de 75 °C das referências de perdas totais e impedância foi confirmada pelo responsável; as tolerâncias indicadas correspondem à Tabela 23 da ABNT NBR 5440:2014 [5].

Os quatro resultados avaliados na Tabela 5 atendem aos valores ou à faixa especificados no projeto. As perdas a vazio e a corrente de excitação estão abaixo das referências, assim como as perdas totais a 75 °C; a impedância de 4,48% encontra-se dentro do intervalo de ±7,5% em torno de 4,50%. Essas comparações constituem evidências de compatibilidade com o projeto, sujeitas às condições experimentais e documentais descritas.

A Celesc E-313.0019 [8] utiliza 85 °C como temperatura de referência das perdas totais para a alternativa construtiva de 60/65 °C, enquanto o sistema do transformador estudado apresenta resultados e valores de projeto a 75 °C. Por essa razão, a coincidência numérica de 3.275 W não autoriza concluir, sem correção térmica e enquadramento documental, conformidade com a especificação externa. A avaliação baseada no próprio projeto, em condições térmicas equivalentes, está apresentada na Tabela 5.

4.9. Síntese dos parâmetros, critérios e limitações

O Quadro 1 reúne as condições de referência, os principais resultados e sua interpretação técnica, separando os ensaios com comparação quantitativa de projeto daqueles para os quais faltam limites específicos ou confirmação integral do procedimento. A Tabela 5 documenta a comparação direta de perdas, corrente de excitação e impedância com os parâmetros cadastrados no projeto; a Celesc E-313.0019 [8] permanece como referência externa

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

complementar, sem equivalência automática de temperatura para perdas totais.

Quadro 1. Síntese dos resultados experimentais, critérios de projeto e limitações

Ensaio	Referência disponível	Registro experimental	Interpretação técnica
Tensão aplicada AT	34 kV; 60 s; 60 Hz [2]	35,2 kV; 61,0 Hz; sem falha relatada	Desvio de tensão requer verificação dos limites dielétricos.
Tensão aplicada BT	10 kV; 60 s; 60 Hz [2]	10,9 kV; sem falha relatada	Ajuste acima da referência; aprovação formal não demonstrada.
Tensão induzida	≈760 V; ≈120 Hz; 60 s [2, 9]	761–776 V; 120,3 Hz; sem falha relatada	Ensaio caracterizado; critérios específicos a confirmar.
Relação de transformação	±0,5% adotados; observar derivação principal [7]	15 leituras; desvio máximo 0,118%	Dentro da faixa adotada; verificar critério específico da derivação principal.
Resistência dos enrolamentos	Não há limite de projeto disponível	BT: D = 0,82%; AT (Tap 1): D = 1,33%	Dispersões descritivas; sem juízo formal de aprovação.
Resistência de isolamento	≈5 kV por 60 s; sem mínimo documentado	AT/BT: 83,7 GΩ; AT/M: 53,8 GΩ; BT/M: 42,7 GΩ	Medições elevadas; falta critério quantitativo de aceitação.
Perdas a vazio / excitação	Projeto: 585 W (+10%); 1,90% (+20%) [5]	501 W; 0,62%	Valores inferiores às referências de projeto.
Perdas totais / impedância	Projeto a 75 °C: 3.275 W (+6%); 4,50% (±7,5%) [5]	3.037 W (75 °C); 4,48%	Compatíveis com os critérios de projeto; laudo integral pendente.

Fonte: elaboração própria, com base nos registros experimentais e nos valores do projeto (Figura 14). Nota: as tolerâncias de perdas e impedância são referidas à Tabela 23 da ABNT NBR 5440:2014 [5]; a avaliação normativa integral dos demais ensaios depende dos procedimentos e limites específicos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo reuniu resultados experimentais de sete grupos de ensaios elétricos realizados em um transformador trifásico de 300 kVA. A interpretação conjunta permitiu caracterizar parâmetros dos enrolamentos, da isolação e do núcleo magnético nas condições registradas, distinguindo grandezas diretamente medidas, valores corrigidos pelo sistema e indicadores calculados nesta análise.

Na relação de transformação, as 15 leituras permaneceram na faixa de ±0,5% adotada,

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

com maior desvio absoluto de aproximadamente 0,118%. As resistências dos enrolamentos apresentaram dispersões de 0,82% (BT) e 1,33% (AT, Tap 1), enquanto as resistências de isolamento foram de 83,7, 53,8 e 42,7 GΩ. Na comparação direta com os parâmetros do projeto, registraram-se 501 W de perdas a vazio frente a 585 W previstos, corrente de excitação de 0,62% frente a 1,90% e perdas totais de 3.037 W a 75 °C frente a 3.275 W na mesma temperatura, 7,27% abaixo da referência. A impedância de 4,48% apresentou desvio relativo de −0,44% em relação aos 4,50% de projeto, permanecendo dentro da faixa de ±7,5% adotada. A referência Celesc de perdas totais, por sua vez, utiliza 85 °C para a alternativa construtiva examinada e não constitui comparação direta com os 75 °C do ensaio. Os resultados de perdas e impedância demonstram compatibilidade com os parâmetros do projeto documentados, sem dispensar a verificação integral dos requisitos aplicáveis.

Nos ensaios dielétricos não foram relatadas falhas durante as aplicações informadas de 60 s na tensão aplicada em AT e BT e na tensão induzida, acompanhadas por cronômetro. As leituras de 35,2 kV na AT e 10,9 kV na BT foram preservadas e justificadas operacionalmente pela sensibilidade limitada do ajuste fino, sem pressupor que os excedentes constituam tolerâncias normativas autorizadas [2]. A impedância medida coincide numericamente com a declarada na placa, mas não está demonstrado que as duas informações sejam independentes. Assim, a documentação dos parâmetros específicos de projeto fortalece o diagnóstico experimental, enquanto a ausência de laudos integrais, de detalhamento das correções do software e de critérios completos para outros ensaios delimita o alcance da conclusão de conformidade.

REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5356-1:2025: Transformadores de potência — Parte 1: Generalidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5356-3:2007: Transformadores de potência — Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar. Versão corrigida 2, 2014. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

[3] HEATHCOTE, Martin J. J & P Transformer Book. 13. ed. Oxford: Newnes, 2007.

[4] CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

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

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5440:2014: Transformadores para redes aéreas de distribuição — Requisitos. Versão corrigida de 2014. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

[6] VICENTE, José Manuel Esteves. Uma contribuição à automação de ensaios em transformadores de potência em média tensão. 2006. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

[7] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60076-1:2011: Power transformers — Part 1: General. 3. ed. Geneva: IEC, 2011.

[8] CELESC DISTRIBUIÇÃO S.A. E-313.0019: Transformadores para redes aéreas de distribuição. Revisão de março de 2025. Florianópolis: Celesc Distribuição, 2025. Disponível em: https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/especificacao-tecnica/E3130019.pdf. Acesso em: 14 nov. 2026.

[9] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60076-3:2013+AMD1:2018: Power transformers — Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air. Consolidated version. Geneva: IEC, 2018.

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