

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

RAIANI FERRARI SANTOS

**AVALIAÇÃO DE TRANSFORMADORES A SECO FRENTE À
PRESENÇA DE HARMÔNICOS:
aplicação do fator K e estudo de caso no IFSC - Câmpus
Florianópolis**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

RAIANI FERRARI SANTOS

**AVALIAÇÃO DE TRANSFORMADORES A SECO FRENTE À
PRESENÇA DE HARMÔNICOS:
aplicação do fator K e estudo de caso no IFSC - Câmpus
Florianópolis**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para a obtenção do título de
Engenheira Eletricista.

Orientadora:
Prof. Lisandra Kittel Ries, Dra.

Coorientador:
Prof. Fábio Victor Schreiber, Me.

FLORIANÓPOLIS, 2026.

AVALIAÇÃO DE TRANSFORMADORES A SECO FRENTE À PRESENÇA DE HARMÔNICOS: aplicação do fator K e estudo de caso no IFSC - Câmpus Florianópolis

RAIANI FERRARI SANTOS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 14 de julho de 2026.

Banca Examinadora:

Lisandra Kittel Ries, Dra. Eng.
Orientadora/IFSC

Fábio Victor Schreiber, Me. Eng.
Coorientador/IFSC

Maria Cláudia de Almeida Castro, Dra. Eng.
IFSC

Fernando Lila, Me. Eng.
IFSC

Beatriz Kretzer, Eng.
Belman Transformadores

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Santos, Raiani Ferrari

AVALIAÇÃO DE TRANSFORMADORES A SECO FRENTE À PRESENÇA DE HARMÔNICOS: aplicação do fator K e estudo de caso no IFSC - Câmpus Florianópolis / Raiani Ferrari Santos; orientação de Lisandra Kittel Ries; coorientação de Fábio Victor Shreiber. - Florianópolis, SC, 2026.

123 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. Fator K. 2. Distorções harmônicas. 3. Transformadores a seco. I. Ries, Lisandra Kittel. II. Shreiber, Fábio Victor. III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. **AVALIAÇÃO DE TRANSFORMADORES A SECO FRENTE À PRESENÇA DE HARMÔNICOS.**

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, inicialmente, aos meus pais, que me apoiaram e me ajudaram muito ao longo dessa trajetória. Nos momentos bons e nos difíceis, vocês estiveram ao meu lado, secando minhas lágrimas, me ouvindo e, acima de tudo, me dizendo que estava tudo bem e que aquilo não era o fim do mundo.

Ao meu namorado, Lucas, agradeço pela parceria, pelo incentivo e pelo apoio constante durante a vida acadêmica e pessoal. Você fez toda a diferença ao me motivar e ensinar, mesmo diante da minha cabeça dura.

À professora Lisandra, minha orientadora, agradeço imensamente pela colaboração e pelo acompanhamento ao longo dos anos, sendo uma referência de presença feminina no curso. Ao professor Fábio, que me auxiliou durante este trabalho, agradeço muitíssimo pelas conversas sobre transformadores e manutenções. Ao professor Lila que, desde o curso técnico integrado, sempre se mostrou um ótimo exemplo, colega de profissão e amigo.

Agradeço, também, aos meus colegas da Belman Transformadores, que contribuíram significativamente para o meu aprendizado sobre o sistema elétrico, especialmente na área de média e baixa tensão. Em especial, agradeço à Beatriz por compartilhar sua experiência profissional comigo e por ser uma importante referência de presença feminina na profissão.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos que acompanharam, desde o princípio, esta passagem pelo IFSC, tanto no curso técnico quanto na graduação. Todos vocês fizeram a diferença para que eu chegasse até aqui.

“There's no reason that this life can't be electric!”

(Katy Perry)

RESUMO

Devido ao crescimento do uso de dispositivos não lineares e à ampla utilização de transformadores no sistema elétrico, o presente trabalho mostra-se relevante por apresentar conceitos e normas importantes para a compreensão e avaliação de transformadores a seco frente às harmônicas de corrente presentes em instalações elétricas. O tema surgiu da experiência da autora durante atividades profissionais na empresa Belman Transformadores, nas quais o fator K foi verificado em análises de energia realizadas para clientes, despertando o interesse pelo aprofundamento do assunto. O objetivo geral consistiu em realizar um estudo de caso para avaliar se a carga solicitada aos transformadores a seco do IFSC – Câmpus Florianópolis excede os limites térmicos estabelecidos pela desclassificação das normas UL 1561 da *Underwriters Laboratories* (UL), EN 50541-2 do *Comité Européen de Normalisation Électrotechnique* (CENELEC) e C57.110 do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), utilizando como base as análises de energia realizadas entre os dias 27 de fevereiro e 27 de março de 2026 nos quadros gerais de baixa tensão (QGBTs). Para a compreensão dessas normas, foi realizada uma revisão bibliográfica referente às distorções harmônicas e aos transformadores, a fim de verificar como as componentes harmônicas interferem nas perdas de um equipamento real. Os resultados foram obtidos com o auxílio de planilhas eletrônicas e evidenciaram quais normas mostraram-se mais conservadoras, bem como determinaram que os transformadores se encontram adequadamente dimensionados em relação à desclassificação decorrente da presença de harmônicas de corrente, sendo recomendado o monitoramento contínuo das temperaturas máximas dos equipamentos via relé de proteção térmica.

Palavras-chave: Fator K. Distorções harmônicas. Transformadores a seco.

ABSTRACT

Due to the increasing use of nonlinear devices and the widespread application of transformers in electrical power systems, this study is relevant because it presents important concepts and standards for understanding and evaluating dry-type transformers under the influence of current harmonics present in electrical installations. The topic arose from the author's experience during professional activities at Belman Transformadores, where K-factors were assessed in power quality analyses conducted for clients, motivating further investigation into the subject. The overall objective was to conduct a case study to assess whether the load demanded on the dry-type transformers at IFSC – Florianópolis Campus exceeds the thermal limits established by the derating of the UL 1561 standard from Underwriters Laboratories (UL), EN 50541-2 from the Comité Européen de Normalisation Électrotechnique (CENELEC), and C57.110 from the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), based on power quality analyses performed between February 27 and March 27, 2026, at the main low-voltage switchboards. To support the understanding of these standards, a literature review on harmonic distortion and transformers was conducted to verify how harmonic components affect the losses of a real transformer. The results were obtained with the aid of electronic spreadsheets and showed which standards were more conservative, as well as determining that the transformers are adequately sized with respect to derating caused by the presence of current harmonics. Continuous monitoring of the maximum equipment temperatures through thermal protection relays is therefore recommended.

Keywords: K-Factor. Harmonic distortions. Dry-type transformers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Forma de onda fundamental, harmônicos e resultante	24
Figura 2 – Espectro harmônico até a 3ª ordem da onda resultante da Figura 1	25
Figura 3 – Harmônicas de 3ª ordem e sua sequência zero.....	26
Figura 4 – Harmônicas de 5ª ordem e sua sequência negativa	27
Figura 5 – Agrupamento triângulo-estrela	29
Figura 6 – Disposição dos principais componentes	30
Figura 7 – Fenômenos de autoindução e indução mútua	31
Figura 8 – Circuito equivalente de um transformador ideal	36
Figura 9 – Circuito equivalente de um transformador real.....	38
Figura 10 – Visão interna da subestação	49
Figura 11 – Ponto de conexão	50
Figura 12 – Cubículo do ramal de entrada e medição de energia elétrica	51
Figura 13 – Cubículo de proteção de média tensão.....	51
Figura 14 – Cubículo reserva	52
Figura 15 – Cubículo do transformador 2.....	53
Figura 16 – Cubículo do transformador 3.....	53
Figura 17 – Cubículo do transformador 4.....	54
Figura 18 – Visão interna da sala de quadros elétricos.....	55
Figura 19 – Quadro geral de baixa tensão 1	55
Figura 20 – Quadro geral de baixa tensão 2	56
Figura 21 – Quadro geral de baixa tensão 3	56
Figura 22 – Quadro geral de baixa tensão 4	57
Figura 23 – Quadro de correção do fator de potência.....	57
Figura 24 – Analisador CW500	58
Figura 25 – Sondas de tensão Yokogawa 98078.....	59
Figura 26 – Sondas de corrente Yokogawa 96065	59
Figura 27 – Analisador instalado junto ao disjuntor geral do QGBT 4.....	61
Figura 28 – Fator Kul durante análise para o transformador 2 (UL 1561)	62
Figura 29 – DRKul durante análise para o transformador 2 (UL 1561)	63
Figura 30 – Fator K durante análise para o transformador 2 (EN 50541-2)	64
Figura 31 – DRK durante análise para o transformador 2 (EN 50541-2)	65
Figura 32 – Fator Fhl durante análise para o transformador 2 (C57.110)	66

Figura 33 – DRFhl durante análise para o transformador 2 (C57.110)	67
Figura 34 – Fator Kul durante análise para o transformador 3 (UL 1561)	69
Figura 35 – DRKul durante análise para o transformador 3 (UL 1561)	70
Figura 36 – Fator K durante análise para o transformador 3 (EN 50541-2)	71
Figura 37 – DRK durante análise para o transformador 3 (EN 50541-2)	72
Figura 38 – Fator Fhl durante análise para o transformador 3 (C57.110)	73
Figura 39 – DRFhl durante análise para o transformador 3 (C57.110)	74
Figura 40 – Fator Kul durante análise para o transformador 4 (UL 1561)	76
Figura 41 – DRKul durante análise para o transformador 4 (UL 1561)	77
Figura 42 – Fator K durante análise para o transformador 4 (EN 50541-2)	78
Figura 43 – DRK durante análise para o transformador 4 (EN 50541-2)	79
Figura 44 – Fator Fhl durante análise para o transformador 4 (C57.110)	80
Figura 45 – DRFhl durante análise para o transformador 4 (C57.110)	81
Figura 46 – Gráfico da corrente de carga média para o transformador 2 (2023)	91
Figura 47 – Gráfico da corrente de carga média para o transformador 2 (2026)	92
Figura 48 – Valores eficazes das harmônicas da fase R para o transformador 2 (2023).....	93
Figura 49 – Valores eficazes das harmônicas da fase S para o transformador 2 (2023).....	94
Figura 50 – Valores eficazes das harmônicas da fase T para o transformador 2 (2023).....	94
Figura 51 – Valores eficazes das harmônicas da fase R para o transformador 2 (2026).....	95
Figura 52 – Valores eficazes das harmônicas da fase S para o transformador 2 (2026).....	95
Figura 53 – Valores eficazes das harmônicas da fase T para o transformador 2 (2026).....	96
Figura 54 – Gráfico da corrente de carga média para o transformador 3 (2023)	97
Figura 55 – Gráfico da corrente de carga média para o transformador 3 (2026)	97
Figura 56 – Valores eficazes das harmônicas da fase R para o transformador 3 (2023).....	99
Figura 57 – Valores eficazes das harmônicas da fase S para o transformador 3 (2023).....	99
Figura 58 – Valores eficazes das harmônicas da fase T para o transformador 3 (2023).....	100
Figura 59 – Valores eficazes das harmônicas da fase R para o transformador 3 (2026).....	100

Figura 60 – Valores eficazes das harmônicas da fase S para o transformador 3 (2026).....	101
Figura 61 – Valores eficazes das harmônicas da fase T para o transformador 3 (2026).....	101
Figura 62 – Gráfico da corrente de carga média para o transformador 4 (2023)	102
Figura 63 – Gráfico da corrente de carga média para o transformador 4 (2026)	103
Figura 64 – Valores eficazes das harmônicas da fase R para o transformador 4 (2023).....	104
Figura 65 – Valores eficazes das harmônicas da fase S para o transformador 4 (2023).....	105
Figura 66 – Valores eficazes das harmônicas da fase T para o transformador 4 (2023).....	105
Figura 67 – Valores eficazes das harmônicas da fase R para o transformador 4 (2026).....	106
Figura 68 – Valores eficazes das harmônicas da fase S para o transformador 4 (2026).....	106
Figura 69 – Valores eficazes das harmônicas da fase T para o transformador 4 (2026).....	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Máxima temperatura dos transformadores com enrolamentos a seco ...	41
Quadro 2 – Máxima temperatura dos transformadores com enrolamentos imersos em óleo	41
Quadro 3 – Valores padrão para o fator K	43
Quadro 4 – Especificações da sonda de tensão	60
Quadro 5 – Especificação das sondas de corrente	60
Quadro 6 – Valores máximos e mínimos do fator Kul para o transformador 2 (UL 1561).....	62
Quadro 7 – Valores máximos e mínimos do DRKul para o transformador 2 (UL 1561).....	63
Quadro 8 – Valores máximos e mínimos do fator K para o transformador 2 (EN 50541-2).....	64
Quadro 9 – Valores máximos e mínimos do DRK para o transformador 2 (EN 50541-2).....	65
Quadro 10 – Valores máximos e mínimos do fator Fhl para o transformador 2 (C57.110)	66
Quadro 11 – Valores máximos e mínimos do DRFhl para o transformador 2 (C57.110).....	67
Quadro 12 – Resumo dos valores máximos e mínimos dos fatores para o transformador 2.....	68
Quadro 13 – Resumo dos valores máximos e mínimos das desclassificações para o transformador 2.....	68
Quadro 14 – Valores máximos e mínimos do fator Kul para o transformador 3 (UL 1561).....	69
Quadro 15 – Valores máximos e mínimos do DRKul para o transformador 3 (UL 1561).....	70
Quadro 16 – Valores máximos e mínimos do fator K para o transformador 3 (EN 50541-2).....	71
Quadro 17 – Valores máximos e mínimos do DRK para o transformador 3 (EN 50541-2).....	72
Quadro 18 – Valores máximos e mínimos do fator Fhl para o transformador 3 (C57.110)	73
Quadro 19 – Valores máximos e mínimos do DRFhl para o transformador 3 (C57.110)	74
Quadro 20 – Resumo dos valores máximos e mínimos dos fatores para o transformador 3.....	75
Quadro 21 – Resumo dos valores máximos e mínimos das desclassificações para o transformador 3.....	75

Quadro 22 – Valores máximos e mínimos do fator Kul para o transformador 4 (UL 1561).....	76
Quadro 23 – Valores máximos e mínimos do DRKul para o transformador 4 (UL 1561).....	77
Quadro 24 – Valores máximos e mínimos do fator K para o transformador 4 (EN 50541-2).....	78
Quadro 25 – Valores máximos e mínimos do DRK para o transformador 4 (EN 50541-2).....	79
Quadro 26 – Valores máximos e mínimos do fator Fhl para o transformador 4 (C57.110).....	80
Quadro 27 – Valores máximos e mínimos do DRFhl para o transformador 4 (C57.110).....	81
Quadro 28 – Resumo dos valores máximos e mínimos dos fatores para o transformador 4.....	82
Quadro 29 – Resumo dos valores máximos e mínimos das desclassificações para o transformador 4.....	82
Quadro 30 – Valores máximos do fator Kul para os transformadores (UL 1561).....	84
Quadro 31 – Valores máximos do fator K para os transformadores (EN 50541-2).....	84
Quadro 32 – Valores máximos do fator Fhl para os transformadores (C57.110).....	85
Quadro 33 – Valores de DRKul para os transformadores (UL 1561).....	85
Quadro 34 – Valores de DRK para os transformadores (EN 50541-2).....	85
Quadro 35 – Valores de DRFhl para os transformadores (C57.110).....	86
Quadro 36 – Valores limites de DRKul e medidos para os transformadores (UL 1561).....	86
Quadro 37 – Valores limites de DRK e medidos para os transformadores (EN 50541-2).....	86
Quadro 38 – Valores limites de DRFhl e medidos para os transformadores (C57.110).....	87
Quadro 39 – Valores mínimos do fator Kul para os transformadores (UL 1561).....	87
Quadro 40 – Valores máximos do fator K para os transformadores (EN 50541-2).....	88
Quadro 41 – Valores máximos do fator Fhl para os transformadores (C57.110).....	88
Quadro 42 – Valores de DRKul para os transformadores (UL 1561).....	88
Quadro 43 – Valores de DRK para os transformadores (EN 50541-2).....	89
Quadro 44 – Valores de DRFhl para os transformadores (C57.110).....	89
Quadro 45 – Valores limites de DRKul e medidos para os transformadores (UL 1561).....	89
Quadro 46 – Valores limites de DRK e medidos para os transformadores (EN 50541-2).....	90

Quadro 47 – Valores limites de DRFhl e medidos para os transformadores (C57.110).....	90
Quadro 48 – Valores máximos e mínimos de corrente de carga média para o transformador 2.....	92
Quadro 49 – Percentil 95% do valor eficaz médio de cada harmônica ímpar para o transformador 2.....	93
Quadro 50 – Valores máximos e mínimos de corrente de carga média para o transformador 3.....	98
Quadro 51 – Percentil 95% do valor eficaz médio de cada harmônica ímpar para o transformador 3.....	98
Quadro 52 – Valores máximos e mínimos de corrente de carga média para o transformador 4.....	103
Quadro 53 – Percentil 95% do valor eficaz médio de cada harmônica ímpar para o transformador 4.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Agência Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BT	Baixa Tensão
CC	Corrente Contínua
CENELEC	<i>Comité Européen de Normalisation Électrotechnique</i>
DHT	Distorção Harmônica Total
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPR	<i>Ethylene Propylene Rubber</i>
FEM	Força Eletromotriz
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MT	Média Tensão
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QGBTs	Quadros Gerais de Baixa Tensão
SIN	Sistema Interligado Nacional
3P4W	<i>Three phases four wires</i>
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UL	<i>Underwriters Laboratories</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	14
1.2	Definição do Problema	15
1.3	Objetivo Geral.....	16
1.4	Objetivos Específicos	16
1.5	Estrutura do Trabalho.....	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Distorções harmônicas.....	18
2.1.1	Principais dispositivos não lineares.....	19
2.1.2	Série de Fourier	20
2.1.3	Classificação	25
2.1.4	Efeito no sistema elétrico	27
2.2	Transformadores.....	28
2.2.1	Indutância mútua.....	30
2.2.2	Transformador ideal	33
2.2.3	Transformador real.....	36
2.2.4	Transformadores a seco	39
2.3	Fator K.....	42
2.3.1	UL 1561.....	43
2.3.2	EN 50541-2	45
2.3.3	C57.110.....	46
3	ESTUDO DE CASO	49
3.1	Subestação	49
3.2	Sala dos quadros elétricos.....	54
3.3	Analisador de energia elétrica	58
3.4	Análises de energia elétrica.....	61
3.4.1	Quadro de baixa tensão do transformador 2.....	61
3.4.2	Quadro de baixa tensão do transformador 3.....	69
3.4.3	Quadro de baixa tensão do transformador 4.....	76
4	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS	83
4.1	Comparação entre normas.....	83
4.2	Comparação entre fatores, níveis de carga e transformadores.....	84
4.3	Comparação entre harmônicas de corrente nos anos de 2023 e 2026.....	91
5	CONCLUSÃO	108
	REFERÊNCIAS	111
	ANEXOS	115
	ANEXO A	116
	ANEXO B	118

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), o Sistema Interligado Nacional (SIN) opera com diferentes níveis de tensão alternada, que variam de 138 a 750 kV. O objetivo principal de usar essas tensões elevadas é reduzir as perdas na transmissão de energia elétrica (Montecelli; Garcia, 2021). Nesse contexto, os transformadores são fundamentais no sistema elétrico, pois convertem a potência elétrica de um nível de tensão para outro, mantendo a frequência. Isso é importante, pois a tensão de distribuição é geralmente realizada em 127, 220 e 380 V (Chapman, 2013).

Por sua vez, devido a sua alta confiabilidade, rapidez de resposta e tamanho compacto, o uso de dispositivos que não seguem a Lei de Ohm, conhecidos como dispositivos não lineares, tem crescido desde a década de 1960 (Ahmed, 2000). Como desvantagem, eles injetam sinais com frequências que são múltiplas inteiras da frequência fundamental, o que causa distorções harmônicas no sinal senoidal. Essas distorções são um fator importante no dimensionamento de equipamentos sensíveis, pois é necessário manter o aquecimento dentro de limites operacionais adequados (Kassick, 2016).

1.1 Justificativa

A escolha do tema desse trabalho é motivada pela experiência prática da autora, adquirida durante atividades profissionais na empresa Belman Transformadores, em que o fator K foi abordado brevemente em análises de energia realizadas para clientes, despertando o interesse pelo tema. Nessas análises, realizadas a partir de medições de corrente e tensão nos terminais de baixa tensão dos transformadores ou em quadros gerais de baixa tensão (QGBTs), verificaram-se distorções harmônicas nas formas de onda da rede elétrica, comum quando há cargas não lineares, como computadores e nobreaks.

Diante disso, um conceito importante é o fator de desclassificação térmica, derivado do fator K, que consiste em um índice utilizado para avaliar a capacidade de um transformador em suportar correntes harmônicas, sem que haja

sobreaquecimento (ABB INC, 2025). Esse conceito é normatizado por vários documentos, como a C57.110 do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE, 2017), a 1561 do *Underwriters Laboratories* (UL, 2023) e a EN 50541-2 do *Comité Européen de Normalisation Électrotechnique* (CENELEC, 2013). Conforme Apriansyah e Garniwa (2021), o fator K é um índice das perdas adicionais causadas por correntes parasitas devido à circulação de harmônicas nos enrolamentos dos transformadores, o que pode afetar o núcleo do equipamento, provocar sobreaquecimento e redução da vida útil. Seu cálculo é especialmente relevante para transformadores do tipo seco para evitar falhas e subdimensionamentos térmicos, pois esse modelo já opera em temperaturas elevadas durante seu funcionamento.

Nesse sentido, como destaca Moreno (2019), a potência solicitada aos transformadores deve ser limitada para mantê-los em níveis seguros de aquecimento. Desta forma, o uso de fatores auxiliares no dimensionamento desses equipamentos é fundamental, principalmente para transformadores do tipo a seco.

1.2 Definição do Problema

O Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) tem como objetivo formar e qualificar profissionais de diversas áreas para os setores produtivos do estado de Santa Catarina (IFSC, 2025). Para atingir esse objetivo, o Câmpus Florianópolis dispõe de diversos laboratórios, como os de informática, máquinas elétricas e processos físico-químicos e biológicos, além de departamentos de tecnologia da informação e suporte técnico, todos equipados com cargas não lineares como computadores, condicionadores de ar *inverter*, lâmpadas *Light Emitting Diode* (LED), nobreaks, entre outras.

As cargas citadas acima são alimentadas por três transformadores do tipo seco, localizados na subestação abaixadora da instituição, estando sujeitos à presença de distorções harmônicas. Essas distorções, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021, p. 8), “são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência

fundamental”, o que pode causar perdas térmicas adicionais e, conseqüentemente, o aquecimento excessivo dos transformadores.

Considerando que a operação prolongada nessas condições pode comprometer a vida útil e o desempenho dos equipamentos, é importante avaliar a intensidade desse fenômeno. Sendo assim, o problema que surge é: os transformadores instalados na subestação da instituição operam dentro do limite térmico de potência estabelecido pelo fator K?

1.3 Objetivo Geral

Avaliar se a carga solicitada aos três transformadores a seco da instituição excede o limite térmico de potência estabelecido pelo fator K, por meio de análises de energia realizadas entre os dias 27 de fevereiro e 27 de março de 2026 nos QGBTs da subestação abaixadora do IFSC – Câmpus Florianópolis, bem como comparar as componentes harmônicas obtidas com aquelas apresentadas no trabalho de Sanders (2025).

1.4 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- a) revisar a literatura sobre distorções harmônicas, transformadores, fator K e desclassificação;
- b) calcular o fator K de cada transformador com base nas componentes harmônicas de corrente obtidas nas análises de energia realizadas junto aos QGBTs, segundo as normas americanas C57.110 (IEEE, 2017) e UL 1561 (UL, 2023), bem como a norma europeia EN 50541-2 (CENELEC, 2013);
- c) determinar a desclassificação térmica dos transformadores em função dos fatores K obtidos;

- d) avaliar se a carga solicitada aos transformadores excede o limite de potência determinado pelo fator K;
- e) comparar os valores de fator K e desclassificação obtidos pelas normas americanas e europeia;
- f) comparar os valores das componentes harmônicas de corrente nos anos de 2023, apresentados no trabalho de Sanders (2025), e 2026.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos principais. O primeiro corresponde à introdução, na qual são apresentadas a justificativa, a definição do problema e os objetivos geral e específicos.

No segundo capítulo, é realizada uma revisão da literatura, abordando temas relacionados às distorções harmônicas, aos transformadores e ao fator K.

O terceiro capítulo apresenta o estudo de caso deste trabalho, contemplando a identificação dos equipamentos da subestação e da sala de quadros elétricos da instituição, a descrição do analisador de energia utilizado e das análises de energia elétrica realizadas. Além disso, são apresentados os cálculos dos fatores e das desclassificações térmicas. Já o quarto capítulo apresenta as comparações pertinentes entre os resultados obtidos no terceiro capítulo.

O quinto capítulo apresenta as conclusões do trabalho e propõe possíveis temas para trabalhos futuros. Por fim, são listadas as referências bibliográficas e os anexos utilizados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão abordados os conceitos relacionados às distorções harmônicas, que estão diretamente ligadas ao comportamento de cargas não lineares e aos efeitos que podem afetar o funcionamento de equipamentos elétricos.

Entre os equipamentos que são sensíveis às distorções harmônicas, os transformadores destacam-se devido ao uso em grande escala nos sistemas elétricos. A presença de distorções harmônicas pode causar aumento das perdas por correntes parasitas, o que ocasiona um maior aquecimento e pode comprometer a vida útil do equipamento, conforme apresentado a seguir.

Para entender como as distorções harmônicas afetam o desempenho do transformador, utiliza-se o fator K. Esse parâmetro é empregado para quantificar a intensidade desses efeitos e será discutido durante o trabalho.

2.1 Distorções harmônicas

Diversos dispositivos não seguem a relação linear entre tensão e corrente definida pela Primeira Lei de Ohm, apresentada na Equação 1 (Alexander; Sadiku, 2013).

$$V = R \cdot I \tag{1}$$

Onde:

V = tensão elétrica [V]

R = resistência elétrica [Ω]

I = corrente elétrica [A]

Quando esses dispositivos são conectados ao sistema elétrico, eles provocam deformações nas formas de onda de corrente e tensão em relação à componente fundamental do sinal senoidal, fenômeno conhecido como distorção

harmônica. Essas deformações podem ser quantificadas por meio da série de Fourier, além de classificadas de acordo com sua ordem e sequência, podendo causar efeitos negativos nos outros componentes elétricos da instalação (Deckmann; Pomilio, 2016).

2.1.1 Principais dispositivos não lineares

Segundo Deckmann e Pomilio (2016), os equipamentos com núcleo ferromagnético, como transformadores e motores, têm características de magnetização não lineares. Isso significa que, mesmo quando esses equipamentos recebem uma tensão não distorcida, a corrente magnetizante resultante tem uma quantidade significativa de componentes harmônicos, devido ao efeito de histerese do material magnético. No entanto, a corrente de magnetização dos equipamentos citados é tipicamente muito inferior à corrente nominal em plena carga, não afetando tanto os sistemas elétricos quando comparada às componentes harmônicas inseridas pelos dispositivos abordados a seguir (Dugan *et al.*, 2002).

De acordo com Dugan *et al.* (2002), os dispositivos a arco elétrico, como fornos, máquinas de solda e luminárias a descarga, geram uma quantidade moderada de distorções harmônicas, que variam em função do comprimento do arco e das características do meio condutor. A injeção de componentes harmônicas é maior no instante de ignição do arco e, na medida que ele se estabiliza, as distorções tendem a permanecer em níveis aceitáveis (Deckmann; Pomilio, 2016).

Em seguida, destacam-se as cargas eletrônicas industriais, como retificadores trifásicos a diodos e/ou tiristores, que operam alternadamente nos estados de bloqueio e condução e podem apresentar potências elevadas, dependendo da aplicação (Moreno, 2019). Esses dispositivos são comumente denominados como interruptores estáticos e, quando realizam a comutação entre estados, injetam quantidades significativas de componentes harmônicas de corrente no sistema elétrico (Deckmann; Pomilio, 2016).

2.1.2 Série de Fourier

Uma função periódica é aquela com repetição de seu comportamento a cada intervalo de T segundos e podendo ser expressa pela Equação 2 (Kassick, 2016).

$$f(t) = f(t + nT) \quad (2)$$

Onde:

$f(t)$ = função periódica

n = número inteiro

T = período da função

De acordo com Alexander e Sadiku (2013), qualquer função periódica de frequência ω_0 pode ser expressa como o somatório de funções senoidais e cossenoides múltiplas inteiras de ω_0 , chamada de série de Fourier, conforme a Equação 3.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (3)$$

Onde:

$f(t)$ = função periódica não senoidal

a_0 = coeficiente relacionado à componente de corrente contínua

a_n e b_n = coeficientes de Fourier

n = ordem da harmônica

ω_0 = frequência fundamental [rad/s], dada pela Equação 4

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

Onde:

ω_0 = frequência fundamental [rad/s]

T = período da função periódica

Os coeficientes a_0 , a_n e b_n são determinados por análises que envolvem integrais trigonométricas ao longo do período da função, como pode ser visto nas Equações 5, 6 e 7 (Kassick, 2016).

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (5)$$

Onde:

a_0 = coeficiente relacionado à componente de corrente contínua

T = período da função periódica

$f(t)$ = função periódica não senoidal

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (6)$$

Onde:

a_n = coeficiente de Fourier referente à amplitude da componente cossenoidal

T = período da função periódica

$f(t)$ = função periódica não senoidal

n = ordem da harmônica

ω_0 = frequência fundamental [rad/s]

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sen(n\omega_0 t) dt \quad (7)$$

Onde:

b_n = coeficiente de Fourier referente à amplitude da componente senoidal

T = período da função periódica

$f(t)$ = função periódica não senoidal

n = ordem da harmônica

ω_0 = frequência fundamental [rad/s]

Pode-se, ainda, representar a série de Fourier na forma amplitude-fase, comumente utilizada para fins de estudo, conforme a Equação 8 (Alexander; Sadiku, 2013).

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n + 90^\circ) \quad (8)$$

Onde:

$f(t)$ = função periódica não senoidal

a_0 = coeficiente relacionado à componente de corrente contínua

A_n = coeficiente de Fourier para forma amplitude-fase, obtido pela Equação 9 ou 11

n = ordem da harmônica

ω_0 = frequência fundamental [rad/s]

ϕ_n = defasagem do sinal de ordem n [°], obtido pela Equação 10 ou 11

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (9)$$

Onde:

A_n = coeficiente de Fourier para forma amplitude-fase

a_n = coeficiente de Fourier referente à amplitude da componente cossenoidal

b_n = coeficiente de Fourier referente à amplitude da componente senoidal

$$\phi_n = -\arctg \frac{b_n}{a_n} \quad (10)$$

Onde:

ϕ_n = defasagem do sinal de ordem n [°]

a_n = coeficiente de Fourier referente à amplitude da componente cossenoidal

b_n = coeficiente de Fourier referente à amplitude da componente senoidal

$$A_n \angle \phi_n = a_n + j b_n \quad (11)$$

Onde:

A_n = coeficiente de Fourier para forma amplitude-fase

ϕ_n = defasagem do sinal de ordem n [°]

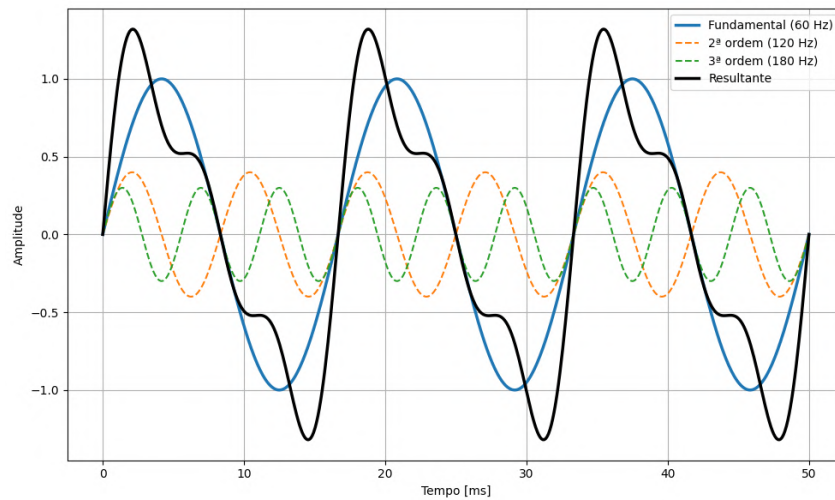
a_n = coeficiente de Fourier referente à amplitude da componente cossenoidal

b_n = coeficiente de Fourier referente à amplitude da componente senoidal

Dada a Equação 12, a Figura 1 ilustra a forma de onda resultante do somatório ponto a ponto das componentes harmônicas de 2ª e 3ª ordem sobre um sinal fundamental de 60 Hz. Ressalta-se que, para fins de aplicação, a quantidade de componentes harmônicas consideradas na análise é limitada, uma vez que as harmônicas de ordem elevada apresentam coeficientes de Fourier muito pequenos em comparação com as primeiras componentes e, portanto, podem ser desprezadas.

$$f(t) = 1 \sin(1 \cdot 377t) + 0,4 \sin(2 \cdot 377t) + 0,3 \sin(3 \cdot 377t) \quad (12)$$

Figura 1 – Forma de onda fundamental, harmônicos e resultante



Fonte: Elaboração própria (2025).

Com a decomposição do sinal distorcido pela série de Fourier, é possível obter um espectro harmônico, que representa as informações de frequência, valor eficaz e fase de cada componente harmônica em forma de um gráfico de barras ou linhas (Dugan *et al.*, 2002). Para funções senoidais puras, o valor eficaz do sinal é obtido por meio da Equação 13 (Alexander; Sadiku, 2013).

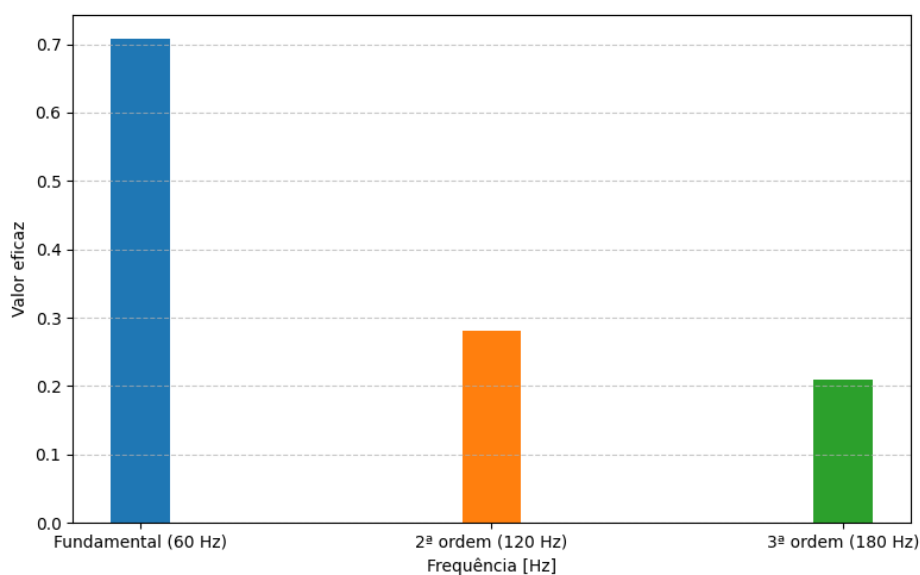
$$A_{n(ef)} = \frac{A_n}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

Onde:

$A_{n(ef)}$ = valor eficaz de A_n

A_n = coeficiente de Fourier para forma amplitude-fase

A Figura 2 apresenta o espectro harmônico da onda da Figura 1, com os valores eficazes das componentes harmônicas de 1ª (fundamental), 2ª e 3ª ordem.

Figura 2 – Espectro harmônico até a 3ª ordem da onda resultante da Figura 1

Fonte: Elaboração própria (2025).

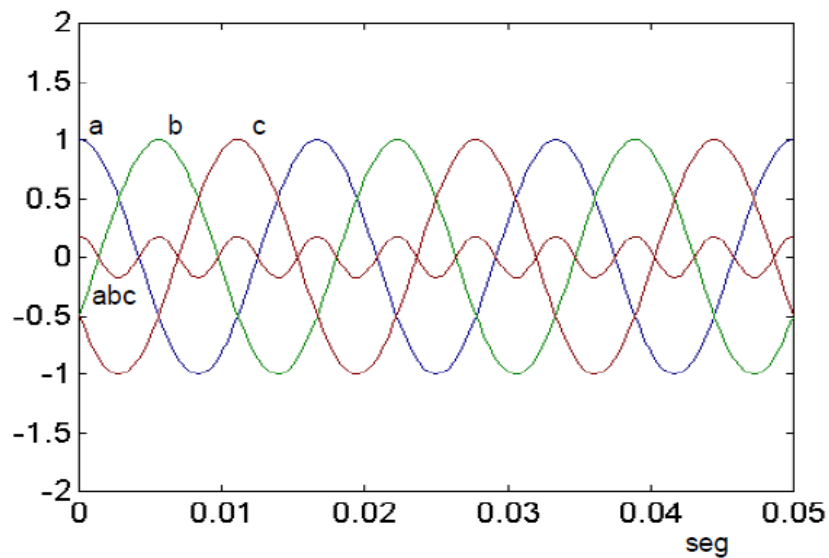
2.1.3 Classificação

Cada componente harmônica possui uma ordem, que representa um múltiplo inteiro da frequência fundamental, e é classificada como par ou ímpar. Nos sistemas de corrente alternada, em que os semiciclos positivo e negativo da forma de onda são simétricos, predominam as harmônicas de ordem ímpar ($n = 3, 5, 7, \dots$). Por outro lado, as harmônicas de ordem par ($n = 2, 4, 6, \dots$) surgem em decorrência de assimetrias do sinal, associadas à presença de componente contínua no sistema, indicando também defeitos em equipamentos ou transdutores. Ressalta-se que retificadores de meia onda e fornos a arco constituem exceções à existência de componentes contínuas, pois produzem harmônicas pares durante seu funcionamento (Dugan *et al.* 2002).

Segundo Dugan *et al.* (2002), as componentes harmônicas também podem ser classificadas de acordo com sua sequência de fase em relação às ondas fundamentais trifásicas. As harmônicas múltiplas de 3 apresentam-se em fase, conforme Figura 3. Caracterizam-se, então, como harmônicas de sequência zero e

podem causar a circulação de correntes significativas pelo condutor neutro de sistemas com ligação em estrela a quatro fios, ou pelo enrolamento em triângulo, no caso de ligação em delta (Deckmann; Pomilio, 2016).

Figura 3 – Harmônicas de 3ª ordem e sua sequência zero



Fonte: Deckmann e Pomilio (2016).

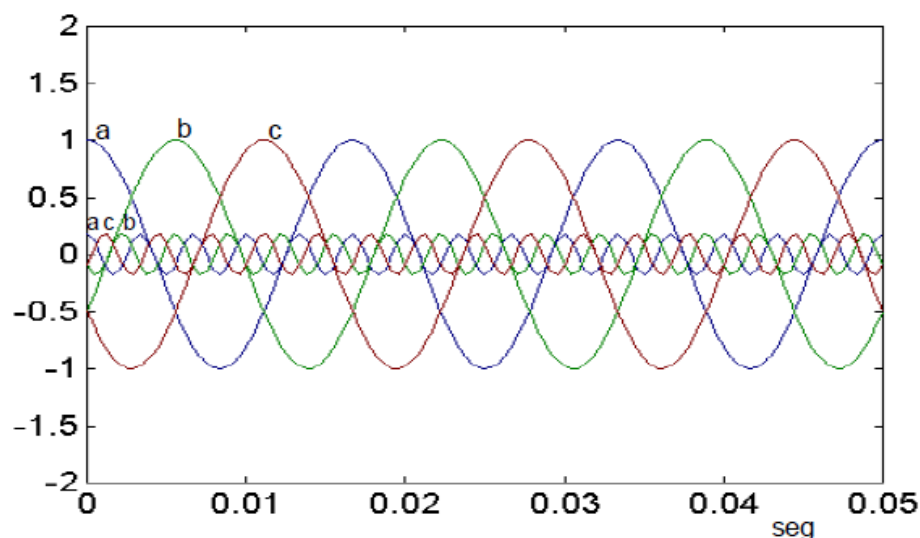
As harmônicas de ordem 2, 5 e 8 são definidas pela Equação 14 e apresentam sequência negativa, conforme Figura 4. Essas componentes podem causar a redução do torque de máquinas com campo girante, assim como vibrações, perdas adicionais e aquecimento (Deckmann; Pomilio, 2016).

$$3k - 1 \quad (14)$$

Onde:

$$k = 1, 2, 3, \dots$$

Figura 4 – Harmônicas de 5ª ordem e sua sequência negativa



Fonte: Deckmann e Pomilio (2016).

Já as harmônicas de ordem 1, 4 e 7, definidas pela Equação 15, apresentam sequência positiva. Essas componentes não causam a redução do torque em máquinas com campo girante, pois giram no mesmo sentido da componente fundamental. No entanto, também podem provocar vibrações, perdas adicionais e aquecimento (Deckmann; Pomilio, 2016).

$$3k - 2 \quad (15)$$

Onde:

$k = 1, 2, 3, \dots$

2.1.4 Efeito no sistema elétrico

De acordo com Dugan *et al.* (2002), os efeitos dos componentes harmônicos no sistema são variados. Os capacitores, por exemplo, podem sofrer elevação de temperatura e perdas, assim como sobretensões e correntes e/ou

tensões ressonantes que podem causar a ruptura do material dielétrico desses e a redução de sua vida útil (Kassick, 2016).

Em transformadores e motores, a presença de componentes harmônicos pode ocasionar vibrações e ruídos, além de perdas no cobre e sobreaquecimento do núcleo ferromagnético, devido ao aumento das perdas por histerese e por correntes parasitas (Deckmann; Pomilio, 2016). Adicionalmente, conforme Dugan *et al.* (2002), transformadores submetidos às formas de onda de corrente com distorção harmônica total (DHT) de 5% apresentam redução de sua potência disponível.

Por fim, a ocorrência de erros de medição, falhas no controle de conversores e atuações indevidas de sistemas de proteção em função dos harmônicos são comuns, podendo ocasionar paradas no sistema elétrico por falhas operacionais (Deckmann; Pomilio, 2016).

2.2 Transformadores

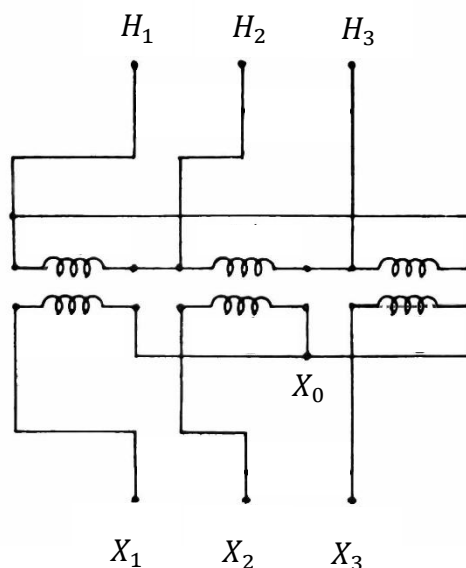
O transformador é um equipamento estático que transfere energia elétrica de um circuito primário para um secundário, ou ainda terciário (Barros; Gedra, 2011). Seu funcionamento se dá pelo fenômeno da indução mútua entre circuitos magneticamente acoplados através de um núcleo formado por chapas de ferrosilício isoladas e sobrepostas com baixa relutância (Jordão, 2017). Esse núcleo deve possuir distância entreferros reduzida e elevada permeabilidade magnética para canalizar o fluxo magnético gerado entre as bobinas (Martignoni, 2003).

Os enrolamentos, também chamados de bobinas, são constituídos por espiras metálicas isoladas por verniz ou papel e têm como função a indução de energia elétrica (Barros; Gedra, 2011). O enrolamento submetido à tensão de entrada é denominado como primário, enquanto aquele que fornece a tensão transformada é denominado como secundário. No entanto, como o fenômeno da indução mútua é reversível, não há distinção entre os enrolamentos, podendo ambos operar como primário ou secundário, conforme sua instalação no sistema elétrico (Martignoni, 2003).

Quanto à classificação por nível de tensão no sistema de distribuição, os enrolamentos podem ser denominados de média tensão (MT), que possuem um maior número de espiras e terminais H_1 , H_2 e H_3 , e de baixa tensão (BT), caracterizados por um menor número de espiras e terminais X_1 , X_2 e X_3 . Desta forma, relacionando essas nomenclaturas, um transformador é denominado elevador quando o enrolamento primário é de BT e abaixador quando o primário é de MT (Martignoni, 2003).

Em sistemas trifásicos utiliza-se transformadores com esse mesmo número de fases, equipamentos formados pela associação de três enrolamentos primários e secundários montados sobre um mesmo núcleo magnético (Martignoni, 2003). Os enrolamentos são comumente interligados nas configurações estrela ou triângulo, representadas, respectivamente, pelos símbolos Y e Δ (Chapman, 2013). Nos sistemas de distribuição, em que se realiza comumente a redução dos níveis de tensão, a ligação triângulo-estrela (Δ/Y) é a mais utilizada, uma vez que possibilita a existência de um ponto de neutro no centro da conexão em estrela, denominado terminal X_0 , conforme Figura 5.

Figura 5 – Agrupamento triângulo-estrela

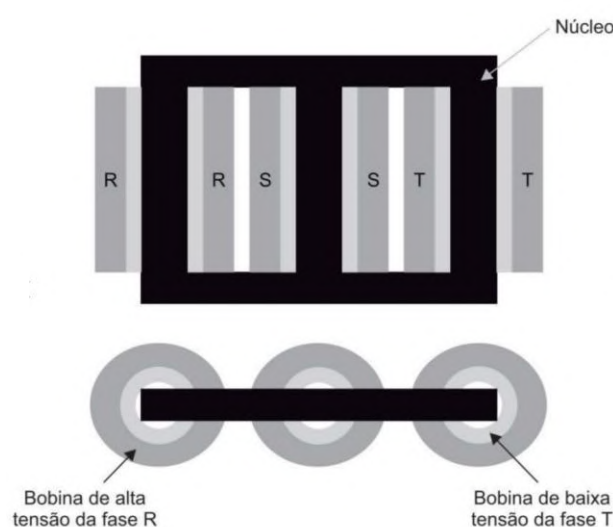


Fonte: Adaptado de Martignoni (2011).

Os enrolamentos e o núcleo devem ser isolados entre si com materiais como papel, papelão e verniz, sendo dispostos conforme Figura 6 para

transformadores trifásicos na configuração de núcleo envolvido (Barros; Gedra, 2011). Por sua vez, os equipamentos instalados em subestações para atendimento de cargas residenciais, comerciais e industriais, usualmente denominados transformadores de potência, são projetados para conciliar a viabilidade econômica com uma adequada regulação de tensão, elevado rendimento e baixas correntes e perdas quando operam em vazio (Jordão, 2017).

Figura 6 – Disposição dos principais componentes



Fonte: Barros e Gedra (2011).

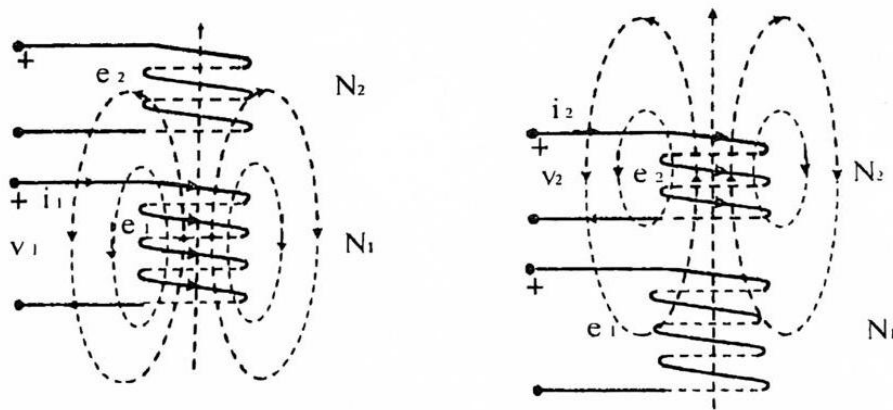
A seguir, são apresentados o fenômeno da indutância mútua, os circuitos equivalentes dos modelos de transformador ideal e real, bem como a tipologia a seco de transformadores.

2.2.1 Indutância mútua

De acordo com Alexander e Sadiku (2013), o fenômeno da indutância mútua ocorre quando dois indutores, ou enrolamentos, estão próximos ao ponto de que o fluxo magnético gerado pela passagem de corrente em um deles se associe ao outro enrolamento, induzindo tensão nesse último.

Na Figura 7 é possível observar os fenômenos de autoindução e indução mútua entre dois enrolamentos, em que cada um dos enrolamentos é alimentado por uma fonte, enquanto o outro permanece em circuito aberto. Dessa forma, N_n , i_n e v_n representam, respectivamente, o número de espiras, a corrente e a tensão da fonte conectada aos terminais do enrolamento n, enquanto e_m corresponde à força eletromotriz (fem) induzida no enrolamento m (Ries, 2007).

Figura 7 – Fenômenos de autoindução e indução mútua



Fonte: Ries (2007).

Considerando apenas um enrolamento, se o fluxo magnético concatenado nele for produzido pela corrente que o circula, essa indutância é denominada autoindutância, sendo expressa pela Equação 16 (Ries, 2007).

$$L_n = \frac{d\lambda_n}{di_n} \quad (16)$$

Onde:

L_n = indutância referente à λ_n [H]

i_n = corrente conduzida no enrolamento n [A]

λ_n = fluxo concatenado no enrolamento n, dado pela Equação 17 [Wb] (Ries, 2007)

$$\lambda_n = N_n \cdot \varphi_n \quad (17)$$

Onde:

N_n = número de espiras do enrolamento n

φ_n = fluxo médio equivalente no enrolamento n [Wb]

Ao considerar dois enrolamentos próximos, se o fluxo magnético concatenado no enrolamento n for produzido pela corrente que circula no enrolamento m, essa indutância é denominada indutância mútua, sendo obtida pela Equação 18. Ressalta-se que a indutância mútua do enrolamento n em relação ao enrolamento m (M_{nm}) é igual a indutância mútua do enrolamento m em relação ao enrolamento n (M_{mn}), caracterizando-se como reversível.

$$M_{nm} = \frac{d\lambda_{nm}}{di_m} \quad (18)$$

Onde:

M_{nm} = indutância referente à λ_{nm} [H]

i_m = corrente conduzida no enrolamento m [A]

λ_{nm} = fluxo concatenado no enrolamento n produzido pela corrente que circula no enrolamento m [Wb]

Já a parte do fluxo magnético que não participa do acoplamento entre os enrolamentos é chamado de fluxo disperso, enquanto aquele que atravessa o segundo enrolamento é chamado de fluxo mútuo. A soma destas parcelas resulta no fluxo total, conforme Equação 19, e seu sentido é dado pela regra da mão direita (Ries, 2007).

$$\varphi_{nn} = \varphi_{dn} + \varphi_{mn} \quad (19)$$

Onde:

φ_{nn} = fluxo total gerado pela corrente que atravessa o enrolamento n [Wb]

φ_{dn} = fluxo disperso gerado pela corrente que atravessa o enrolamento n [Wb]

φ_{mn} = fluxo mútuo gerado pela corrente que atravessa o enrolamento n e é sentido pelo enrolamento m [Wb]

Pela Lei de Faraday, é possível determinar a fem induzida nos terminais dos enrolamentos por meio da Equação 20 (Ries, 2007). Com isso, o acoplamento mútuo só é possível quando os enrolamentos são alimentados por fontes de tensão variável, pois os indutores passam a se comportar como curto-circuito em corrente contínua (CC) (Alexander; Sadiku, 2013).

$$e_m = N_m \frac{d\varphi_{mn}}{dt} \quad (20)$$

Onde:

e_m = fem induzida no enrolamento m [V]

N_m = número de espiras do enrolamento n

φ_{mn} = fluxo mútuo gerado pela corrente que atravessa o enrolamento n e é sentido pelo enrolamento m [Wb]

Por fim, é necessário estabelecer a polaridade dos enrolamentos de acordo com sua orientação ou bobinagem. Usualmente, utiliza-se a convenção do ponto para indicar o sentido do fluxo magnético e, caso a corrente entre pelo terminal do enrolamento marcado com ponto, a tensão mútua no segundo enrolamento deve ser positiva no terminal marcado com outro ponto (Alexander; Sadiku, 2013).

2.2.2 Transformador ideal

Segundo Martignoni (2003), o princípio de funcionamento de um transformador pode ser facilmente compreendido por meio da análise de um transformador ideal. Nesse modelo, as resistências elétricas dos enrolamentos, as perdas no ferro e as dispersões magnéticas são nulas.

Considerando o funcionamento a vazio, no qual uma tensão é aplicada ao enrolamento primário enquanto o secundário permanece em circuito aberto, não há circulação de corrente no enrolamento secundário. Desprezando-se, também, a resistência ôhmica dos enrolamentos, o primário comporta-se como um elemento puramente indutivo, além de que o fluxo magnético gerado se encontra totalmente concatenado no enrolamento secundário. Desta forma, é possível utilizar a Equação 20 para obter a Equação 21, em que fem induzida igual à tensão nos terminais do enrolamento, pois não ocorre queda de tensão (Martignoni, 2003).

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad (21)$$

Onde:

a = relação de transformação

N_1 = número de espiras do enrolamento primário

N_2 = número de espiras do enrolamento secundário

V_1 = tensão nos terminais do enrolamento primário [V]

V_2 = tensão nos terminais do enrolamento secundário [V]

E_1 = valor eficaz da fem induzida no enrolamento primário [V]

E_2 = valor eficaz da fem induzida no enrolamento secundário [V]

Ao conectar uma carga aos terminais secundários do modelo ideal, obtém-se a Equação 23, que associa a relação de transformação do transformador às correntes nos enrolamentos, uma vez que a potência aparente de entrada é igual à potência aparente de saída, conforme Equação 22 (Chapman, 2013).

$$S_1 = S_2 \therefore V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \quad (22)$$

Onde:

S_1 = potência aparente no circuito do enrolamento primário [VA]

S_1 = potência aparente no circuito do enrolamento secundário [VA]

V_1 = tensão nos terminais do enrolamento primário [V]

V_2 = tensão nos terminais do enrolamento secundário [V]

I_1 = corrente que percorre o enrolamento primário [A]

I_2 = corrente que percorre o enrolamento secundário [A]

$$a = \frac{I_2}{I_1} \quad (23)$$

Onde:

a = relação de transformação

I_1 = corrente que circula no enrolamento primário [A]

I_2 = corrente que circula no enrolamento secundário [A]

De acordo com Chapman (2013), para equipamentos trifásicos, a relação de tensão entre primário e secundário pode variar de acordo com o esquema de ligação. Para o agrupamento triângulo-estrela, é dada a Equação 24, que relaciona a tensão de linha do enrolamento primário (V_{L1}), que é igual a tensão de fase (V_{F1}), com a tensão de linha e fase do secundário (V_{L2} e V_{F2}).

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{L1} \angle 0^\circ}{V_{F2} \angle 30^\circ} = \frac{V_{L1}}{\frac{V_{L2}}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ} \quad (24)$$

Onde:

a = relação de transformação

N_1 = número de espiras do enrolamento primário

N_2 = número de espiras do enrolamento secundário

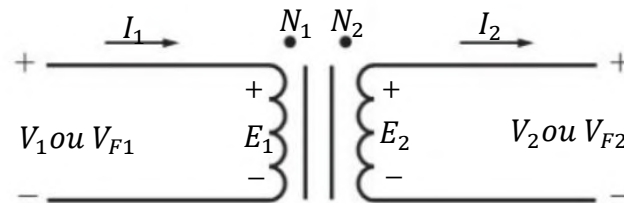
V_{L1} = tensão de linha nos terminais do enrolamento primário [V]

V_{L2} = tensão de linha nos terminais do enrolamento secundário [V]

V_{F2} = tensão de fase nos terminais do enrolamento secundário [V]

Na Figura 8 é possível observar o circuito equivalente de um transformador ideal, reunindo os conceitos abordados por meio de uma modelagem do equipamento.

Figura 8 – Circuito equivalente de um transformador ideal



Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

2.2.3 Transformador real

Considerando o funcionamento com carga, onde uma impedância é conectada aos terminais secundários do transformador, há a circulação de corrente no enrolamento secundário (I_2) devido ao circuito fechado. A passagem dessa corrente pelo enrolamento secundário gera um fluxo magnético que altera aquele inicialmente produzido pelo enrolamento primário (Ries, 2007).

Para manter o fluxo aproximadamente constante, o enrolamento primário passa a absorver mais corrente da fonte. Dessa forma, a corrente no primário é composta pela componente associada à corrente de carga (I_1'), além da corrente magnetizante (I_m), responsável pela criação do fluxo no núcleo, obtendo-se a Equação 25 (Martignoni, 2003).

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1'} \quad (25)$$

Onde:

a = relação de transformação

N_1 = número de espiras do enrolamento primário

N_2 = número de espiras do enrolamento secundário

I_1' = corrente de carga do enrolamento primário [A]

I_2 = corrente que circula no enrolamento secundário [A]

E_1 = valor eficaz da fem induzida no enrolamento primário [V]

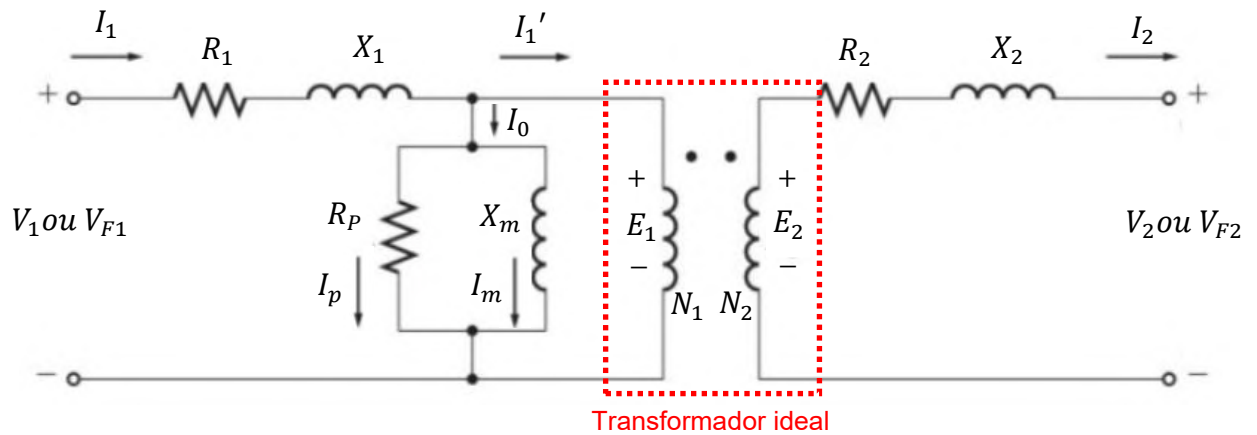
E_2 = valor eficaz da fem induzida no enrolamento secundário [V]

Na modelagem real do transformador, são consideradas as dispersões do fluxo magnético produzidas pelos enrolamentos primário (L_1) e secundário (L_2), percorrida pelas correntes I_1 e I_2 . O fluxo magnético principal do acoplamento entre os enrolamentos é representado pela indutância de magnetização (L_m) e é percorrido pela corrente I_m (Ries, 2007). Esses efeitos são modelados por meio de indutâncias equivalentes no circuito, componentes que armazenam energia no campo magnético devido às correntes que percorrem os enrolamentos (Alexander; Sadiku, 2013).

Segundo Ries (2007, p. 8), “com a passagem do fluxo magnético, ocorrem duas espécies de perdas no núcleo: perdas por histerese e perdas por correntes parasitas ou de Foucault”. Essas perdas são representadas no modelo equivalente por um elemento resistivo (R_p) em paralelo com L_m , que será percorrido pela corrente de perdas no ferro (I_p). A soma vetorial das componentes I_m e I_p resulta na corrente de excitação do transformador (I_0).

Por último, são adicionados elementos resistivos (R_1 e R_2) em série com L_1 e L_2 , respectivamente, que representam as perdas ôhmicas associadas aos enrolamentos do transformador (Jordão, 2017). Na Figura 9 é possível observar o circuito equivalente de um transformador real, além do local do circuito no qual pode-se aplicar o modelo ideal.

Figura 9 – Circuito equivalente de um transformador real



Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

Onde:

X_1 = reatância de dispersão do primário, referente à L_1 [Ω]

X_2 = reatância de dispersão do secundário, referente à L_2 [Ω]

X_m = reatância de magnetização do núcleo, referente à L_m [Ω]

N_1 = número de espiras do enrolamento primário

N_2 = número de espiras do enrolamento secundário

I_1 = corrente que circula no enrolamento primário [A]

I_1' = corrente de carga do enrolamento primário [A]

I_2 = corrente que circula no enrolamento secundário [A]

I_p = corrente de perdas no ferro [A]

I_m = corrente magnetizante [A]

I_0 = corrente de excitação [A]

E_1 = valor eficaz da fem induzida no enrolamento primário [V]

E_2 = valor eficaz da fem induzida no enrolamento secundário [V]

As reatâncias citadas acima podem ser calculadas pela Equação 26 (Alexander; Sadiku, 2013):

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (26)$$

Onde:

X = reatância [Ω]

f = frequência [Hz]

L = indutância [H]

É possível, ainda, referenciar as impedâncias elétricas do enrolamento primário ao secundário e vice-versa, conforme Equação 27 (Chapman, 2023):

$$Z_1' = \frac{Z_1}{a^2} \quad (27)$$

Onde:

Z_1' = impedância elétrica do enrolamento primário referida ao secundário [Ω]

Z_1 = impedância elétrica do enrolamento primário [Ω]

a = relação de transformação

2.2.4 Transformadores a seco

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2016, p. 2), transformadores a seco são aqueles “cuja parte ativa não é imersa em líquido isolante”. Nesse modelo, os enrolamentos são revestidos por uma camada de resina epóxi responsável pelo isolamento elétrico (Barros; Gedra, 2011). Sua refrigeração ocorre por meio da circulação de ar no equipamento, sendo importante que a subestação proporcione ventilação necessária à refrigeração do transformador através de entradas e saídas de ar localizadas na parte inferior e superior das paredes de seu cubículo, respectivamente (WEG, 2023), ou ainda um sistema de ventilação forçada (Celesc, 2016).

Os transformadores a seco são utilizados principalmente em locais internos, e trazem menor risco de explosões e propagação de fogo, além de maior preservação do meio ambiente, quando comparados aos equipamentos imersos em óleo, que pode ocasionar contaminação do solo e recursos hídricos (WEG, 2025). No entanto, os transformadores a seco tendem a apresentar níveis de ruído mais elevados causados pelas vibrações do núcleo magnético, quando comparados aos equipamentos a óleo. Para a mitigação desses ruídos, podem ser adotadas medidas construtivas, como o reaperto e a fixação do núcleo e dos componentes estruturais, além da instalação de amortecedores e da alocação do transformador em salas com maior coeficiente de absorção sonora (Kulkarni; Khaparde, 2004).

Segundo a International Electrotechnical Commission (IEC, 2008), a operação de transformadores a seco acima de sua potência nominal é um dos principais fatores responsáveis pela elevação de sua temperatura. Isso se deve ao aumento da corrente nos enrolamentos, que intensifica as perdas por efeito Joule no equipamento (Kulkarni; Khaparde, 2004). Assim, conforme previsto pela NBR 5356-11 (2016), é necessária a instalação de relés de proteção térmica para monitoramento das temperaturas instantâneas e máximas do transformador.

Os limites de elevação de temperatura em transformadores a seco são definidos de acordo com sua classe de isolamento e normalmente monitorados nos enrolamentos de baixa tensão do equipamento por meio de termistores do tipo PT100, uma vez que esses enrolamentos conduzem maiores correntes (Elias Filho, 2024). No Quadro 1, observa-se que os valores limites de temperatura para transformadores a seco são, em geral, superiores aos definidos para transformadores a óleo, apresentados no Quadro 2.

Quadro 1 – Máxima temperatura dos transformadores com enrolamentos a seco

Temperatura máxima do sistema de isolamento (°C)	Máxima temperatura de enrolamento a seco (°C)
105 (A)	95
120 (E)	110
130 (B)	120
155 (F)	145
180 (H)	170
200	190
220	210

Fonte: Adaptado de ABNT (2016).

Quadro 2 – Máxima temperatura dos transformadores com enrolamentos imersos em óleo

Sistema de preservação de óleo	Máxima temperatura de enrolamento (°C)	
	Circulação do óleo natural ou forçada sem fluxo de óleo dirigido	Circulação forçada de óleo com fluxo dirigido
Sem conservador e sem gás inerte sob pressão	55	60
	95	100
Com conservador ou com gás inerte sob pressão	55	60
	65	70
	95	100

Fonte: Adaptado de ABNT (2007).

Para ABB INC (2025), os transformadores que alimentam cargas não lineares, especialmente do tipo a seco, estão sujeitos a maiores níveis de vibração e elevação de temperatura pela circulação de harmônicas de corrente. Esse aquecimento elevado acelera o processo de envelhecimento dos materiais isolantes e aumenta a probabilidade de falhas prematuras, reduzindo significativamente a vida útil do transformador (IEC, 2008). Nessas condições, faz-se necessária a utilização de mais quantidade de material no núcleo e nos enrolamentos, além de diferentes técnicas de construção, como a instalação de um condutor e/ou barramento de neutro com

tamanho duplo, caracterizando um equipamento com fator K acima de 1 (ABB INC, 2025).

2.3 Fator K

De acordo com Apriansyah e Garniwa (2021), o fator K é definido como o índice que quantifica o efeito das componentes harmônicas nas perdas por correntes parasitas. Esse fator determina a desclassificação térmica de transformadores, o que possibilita avaliar a capacidade máxima de potência de transformadores submetidos a cargas não lineares.

Essas perdas causam aquecimento adicional em transformadores, como verificado anteriormente. Assim, faz-se necessária a criação de equipamentos com fator K não unitário, projetados de forma a permitir a operação dos transformadores até a capacidade nominal, sem que haja diminuição de potência (Gouda; Amer; Salem, 2011). O Quadro 3 apresenta valores padronizados de fator K para transformadores que atendem cargas típicas de instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais.

Quadro 3 – Valores padrão para o fator K

Carga	Fator K
Lâmpadas incandescentes	K-1
Aquecedores com resistências elétricas	
Motores	
Controles de transformadores/ dispositivos com controles eletromagnéticos	
Geradores	
Iluminadores elétricos de descarga	K-4
Equipamentos com aquecimento por indução	
Soldadores	
CLP e controladores de estado sólido	
Equipamentos de telecomunicação	K-13
Circuitos com receptores multifios	
Linhas de produção	
Drives de motores	K-20
Circuitos de áreas críticas (hospitais)	
Circuitos industriais	K-30
Circuitos médicos	
Circuitos de laboratórios educacionais	
Circuitos de micro/mini escritórios	
Outras cargas com alto índice de harmônicos	K-40

Fonte: Adaptado de UL (2023).

As normas C57.110 da IEEE, 1561 da UL e EN 50541-2 da CENELEC mostram alguns métodos para determinar a redução da capacidade nominal de um transformador, como detalhado a seguir.

2.3.1 UL 1561

A norma UL 1561, publicada em 1980 e com última revisão em 2023, apresenta um método de cálculo do fator K_{UL} para transformadores, conforme Equação 28 (UL, 2023):

$$K_{UL} = \sum_{n=1}^{n=m\acute{a}x} \left(\frac{I_n}{I_{ef}} \right)^2 \cdot n^2 \quad (28)$$

Onde:

K_{UL} = fator K referente à norma UL

n = ordem do componente harmônico

I_n = corrente eficaz da componente de ordem n [A]

I_{ef} = corrente eficaz medida [A], dada pela Equação 29:

$$I_{ef} = \left(\sum_{n=1}^{n=m\acute{a}x} I_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

Onde:

I_{ef} = corrente eficaz medida [A]

I_n = corrente eficaz da componente de ordem n [A]

O valor da desclassificação do transformador é determinado pela Equação 30 (UL, 2023), correspondendo à porcentagem máxima da potência aparente nominal do equipamento que pode ser utilizada sem que ocorra sobreaquecimento:

$$DRK_{UL} = \sqrt{\frac{1+e}{1+K_{UL} \cdot e}} \quad (30)$$

Onde:

DRK_{UL} = desclassificação (*derating*) referente à norma UL

e = estimativa das perdas por correntes parasitas à frequência fundamental dividida pelas perdas por efeito Joule [pu]

A estimativa de perda pode, ainda, ser calculada pela Equação 31 (Ries, 2007):

$$e = \frac{R}{R_{cc}} - 1 \quad (31)$$

Onde:

e = estimativa das perdas por correntes parasitas à frequência fundamental dividida pelas perdas por efeito Joule [pu]

R = resistência elétrica equivalente das perdas totais [Ω]

R_{cc} = resistência elétrica medida em corrente contínua [Ω]

Com base nos métodos de obtenção da potência ativa trifásica (Alexander; Sadiku, 2013), a resistência equivalente de perdas totais é dada pela Equação 32:

$$R = \frac{P_{totais}}{3 \cdot I_{curto-circuito}^2} \quad (32)$$

Onde:

R = resistência elétrica equivalente das perdas totais [Ω]

P_{totais} = perdas totais obtidas pelo ensaio de curto-circuito [W]

$I_{curto-cuito}$ = corrente elétrica do ensaio de curto-circuito [A]

2.3.2 EN 50541-2

A norma EN 50541-2, publicada em 2013, apresenta um método de cálculo do fator K para transformadores, conforme Equação 33 (CENELEC, 2013):

$$K = \left[1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I_{ef}} \right)^2 \sum_{n=1}^{n=máx} n^q \left(\frac{I_n}{I_{ef}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$

Onde:

K = fator K referente à norma CENELEC

n = ordem do componente harmônico

e = estimativa das perdas por correntes parasitas à frequência fundamental dividida pelas perdas por efeito Joule [pu]

I_1 = corrente eficaz da componente fundamental [A]

I_n = corrente eficaz da componente de ordem n [A]

I_{ef} = corrente eficaz medida [A]

q = constante dependente do tipo de enrolamento e frequência. Para transformadores cujos enrolamentos de baixa e média/alta tensão são constituídos por condutores de seção circular ou retangular, adota-se o valor aproximado de 1,7 (CENELEC, 2013)

O valor de desclassificação do transformador é determinado pela Equação 34 (CENELEC, 2013), correspondendo à porcentagem máxima da potência aparente nominal do equipamento que pode ser utilizada sem que ocorra sobreaquecimento:

$$DRK = \frac{1}{K} \quad (34)$$

Onde:

DRK = desclassificação (*derating*) referente à norma CENELEC

K = fator K referente à norma CENELEC

2.3.3 C57.110

A norma C57.110, publicada em 1986 e com última revisão em 2018, apresenta um método de cálculo do fator F_{HL} para transformadores, conforme Equação 35 (IEEE, 2018):

$$F_{HL} = \frac{\sum_{n=1}^{n=\text{máx}} \left(\frac{I_n}{I_{ef}} \right)^2 \cdot n^2}{\sum_{n=1}^{n=\text{máx}} \left(\frac{I_n}{I_{ef}} \right)^2} \quad (35)$$

Onde:

F_{HL} = fator de perdas harmônicas referente à norma IEEE

n = ordem do componente harmônico

I_n = corrente eficaz da componente de ordem n [A]

I_{ef} = corrente eficaz medida [A]

O valor de desclassificação do transformador é determinado pela Equação 36 (IEEE, 2018), correspondendo à porcentagem máxima da potência aparente nominal do equipamento que pode ser utilizada sem que ocorra sobreaquecimento:

$$DR_{F_{HL}} = \sqrt{\frac{P_{carga}}{1+F_{HL} \cdot P_{EC}}} \cdot \sqrt{\frac{1+e}{1+F_{HL} \cdot e}} \quad (36)$$

Onde:

$DR_{F_{HL}}$ = desclassificação (*derating*) referente à norma IEEE

F_{HL} = fator de perdas harmônicas referente à norma IEEE

P_{carga} = perdas em carga para potência nominal [pu], dado pela Equação 37 (Ries, 2007)

P_{EC} = perdas por correntes parasitas para potência nominal [pu]

$$P_{carga} = P_{joule} + P_{EC} \cdot (1 + e) \cdot P_{joule} \quad (37)$$

Onde:

P_{carga} = perdas em carga para potência nominal [pu]

P_{joule} = perdas Joule para potência nominal [pu]

P_{EC} = perdas por correntes parasitas para potência nominal [pu]

e = estimativa das perdas por correntes parasitas à frequência fundamental dividida pelas perdas por efeito Joule [pu]

3 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso consiste na caracterização da subestação e seus equipamentos, como disjuntor de média tensão e transformadores, além da sala dos quadros elétricos e do analisador de energia instalado. Em seguida, são apresentados os gráficos dos fatores K e de suas respectivas desclassificações ao longo das análises realizadas.

3.1 Subestação

A subestação do IFSC – Câmpus Florianópolis é do tipo abrigada, com uma potência de transformação instalada de 1.500 kVA. Seus equipamentos estão dispostos em seis cubículos que incluem ramal de entrada e medição, disjuntor de média tensão, reserva, transformador 2, transformador 3 e transformador 4, como pode ser visto na Figura 10 e nos tópicos a seguir.

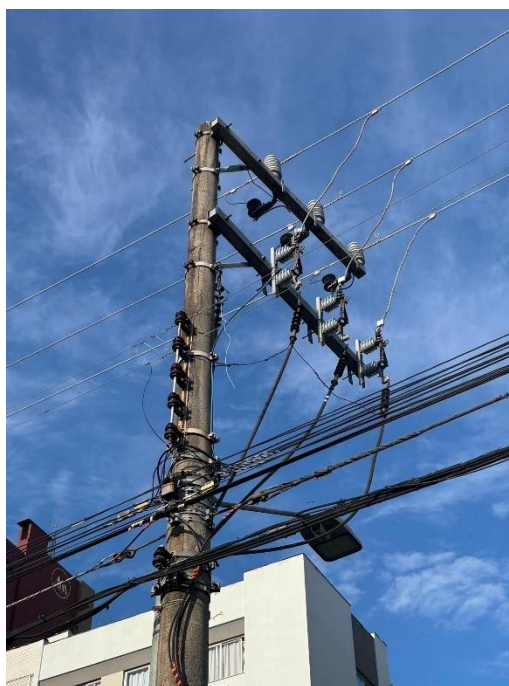
Figura 10 – Visão interna da subestação



Fonte: Elaboração própria (2026).

O ponto de conexão com a concessionária é composto por três chaves do tipo faca, devido à potência instalada, conforme Figura 11. A tensão de alimentação do ramal de entrada subterrâneo é de 13,8 kV.

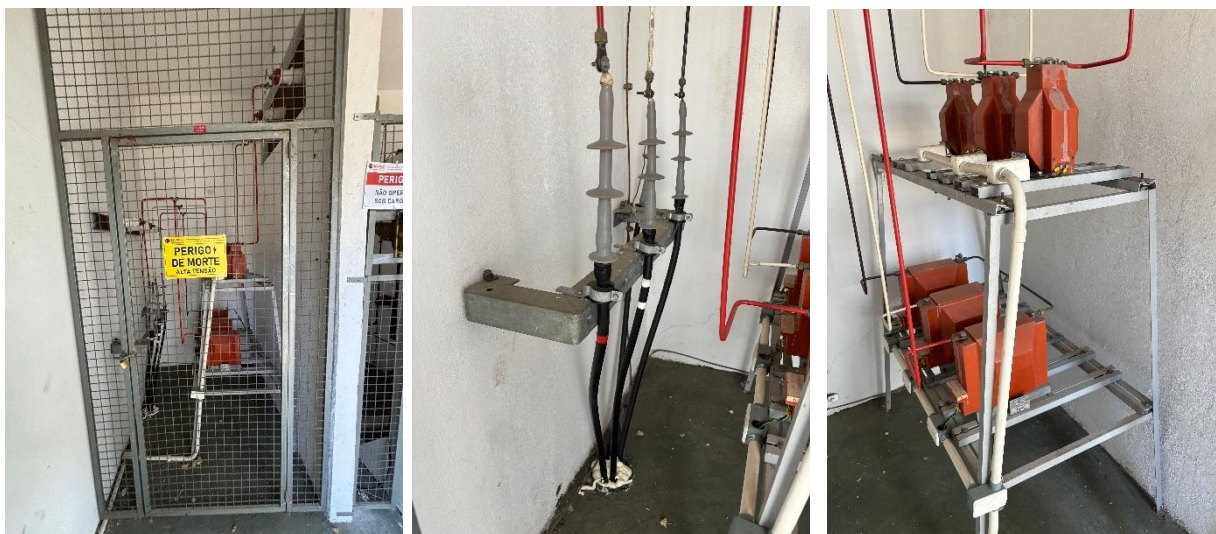
Figura 11 – Ponto de conexão



Fonte: Elaboração própria (2026).

O ramal de entrada é composto por quatro cabos de média tensão de 35 mm², com isolamento de *Ethylene Propylene Rubber* (EPR). Por sua vez, a medição de energia elétrica da subestação é realizada em média tensão por três transformadores de corrente (TCs) e de potencial (TPs). O cubículo, o ramal de entrada e os transformadores de medição podem ser observados na Figura 12.

Figura 12 – Cubículo do ramal de entrada e medição de energia elétrica



Fonte: Elaboração própria (2026).

O cubículo de proteção é composto por um TP auxiliar de 13.800/220 V, uma chave seccionadora, três TCs de 150/5 A, um disjuntor de média tensão Evolis da Schneider Electric, com tensão e corrente nominal de 17.500 V e 630 A, um relé de proteção URP6000-5 da Pextron e um nobreak, com saída de 220 V, conforme Figura 13.

Figura 13 – Cubículo de proteção de média tensão





Fonte: Elaboração própria (2026).

O cubículo reserva é composto apenas por uma chave seccionadora com fusíveis tipo HH, que se encontra aberta, pois não há transformador sendo alimentado neste cubículo. O cubículo e a chave podem ser observados na Figura 14.

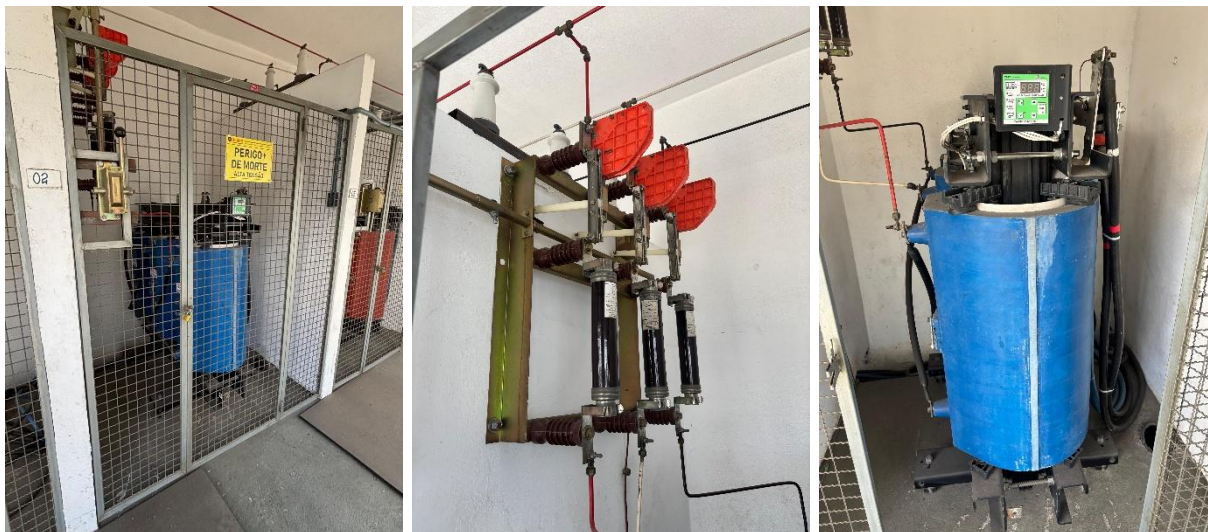
Figura 14 – Cubículo reserva



Fonte: Elaboração própria (2026).

O cubículo do transformador 2 é composto por uma chave seccionadora com fusíveis tipo HH de 40 A e um transformador a seco de 500 kVA da marca Comtrafo, que não possui placa de identificação, conforme Figura 15.

Figura 15 – Cubículo do transformador 2



Fonte: Elaboração própria (2026).

O cubículo do transformador 3 é composto por uma chave seccionadora com fusíveis tipo HH de 40 A e um transformador a seco de 500 kVA da marca Onix, com impedância de 7,30 %, *tap* na posição 2 (13.200 kV) e tensão secundária de 380/220 V, conforme Figura 16.

Figura 16 – Cubículo do transformador 3



Fonte: Elaboração própria (2026).

O cubículo do transformador 4 é composto por uma chave seccionadora com fusíveis tipo HH de 40 A e um transformador a seco de 500 kVA da marca Jund-Trafo, com impedância de 5,48 %, *tap* na posição 2 (13.200 kV) e tensão secundária de 380/220 V, conforme Figura 17. O equipamento foi instalado no local durante a manutenção realizada em 2024 e seu certificado de ensaios encontra-se em anexo, na página 116.

Figura 17 – Cubículo do transformador 4



Fonte: Elaboração própria (2026).

3.2 Sala dos quadros elétricos

A sala dos quadros elétricos está alocada ao lado da subestação do IFSC – Câmpus Florianópolis e abriga os quadros gerais de baixa tensão e os quadros de correção do fator de potência, como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 – Visão interna da sala de quadros elétricos



Fonte: Elaboração própria (2026).

O QGBT 1 se encontra desativado, uma vez que não há transformador 1 na subestação, presente na Figura 19 e já citado anteriormente.

Figura 19 – Quadro geral de baixa tensão 1



Fonte: Elaboração própria (2026).

O QGBT 2 é referente ao transformador 2 e possui um disjuntor geral com corrente ajustada em 800 A, conforme Figura 20.

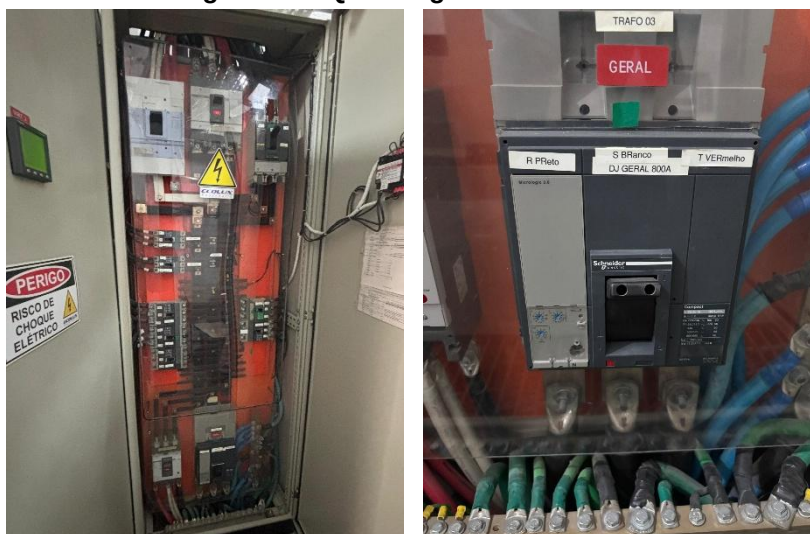
Figura 20 – Quadro geral de baixa tensão 2



Fonte: Elaboração própria (2026).

O QGBT 3 é referente ao transformador 3 e possui um disjuntor geral com corrente ajustada em 320 A, conforme Figura 21.

Figura 21 – Quadro geral de baixa tensão 3



Fonte: Elaboração própria (2026).

O QGBT 4 é referente ao transformador 4 e possui um disjuntor geral com corrente ajustada em 760 A, conforme Figura 22.

Figura 22 – Quadro geral de baixa tensão 4



Fonte: Elaboração própria (2026).

Há ainda dois quadros de correção do fator de potência na sala, referentes aos QGBTs 3 e 4, conforme Figura 23.

Figura 23 – Quadro de correção do fator de potência

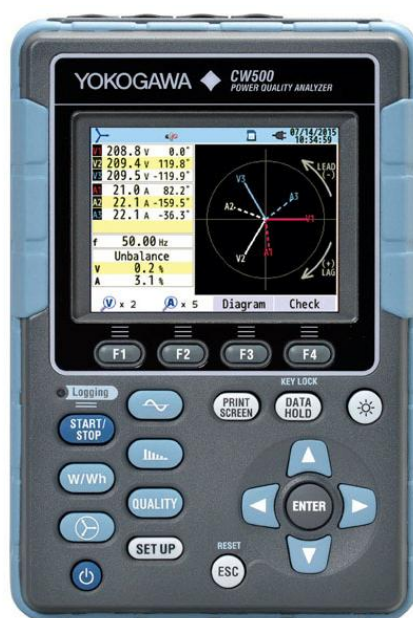


Fonte: Elaboração própria (2026).

3.3 Analisador de energia elétrica

As grandezas elétricas foram medidas com o analisador de energia elétrica CW500 da marca Yokogawa, semelhante ao equipamento da Figura 24. De acordo com a Yokogawa (2021), o analisador atende às normas IEC 61.010-1 e 61.000-4-30, que preveem requisitos gerais para segurança de equipamentos elétricos e padronização internacional das medições referentes à qualidade de energia, respectivamente.

Figura 24 – Analisador CW500



Fonte: Yokogawa (2021).

As medidas foram obtidas por meio de quatro sondas de tensão tipo garra Yokogawa 98078 e três sondas de corrente tipo bobina de Rogowski Yokogawa 96065, conforme Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 – Sondas de tensão Yokogawa 98078



Fonte: Yokogawa (2021).

Figura 26 – Sondas de corrente Yokogawa 96065



Fonte: Yokogawa (2021).

O Quadro 4 e Quadro 5 apresentam algumas das especificações das sondas de tensão e corrente, respectivamente.

Quadro 4 – Especificações da sonda de tensão

Cores	Vermelho, preto, branco e azul
Diâmetro	4mm
Comprimento	$\pm 3m$

Fonte: Yokogawa (2021).

Quadro 5 – Especificação das sondas de corrente

Diâmetro	110mm
Faixa de entrada	1000A (AC)
Faixa de saída	500mV (AC)
Precisão (50 ou 60 Hz)	$\pm 0.8\%$ Leit. ± 0.2 mV
Tensão máxima	600 Vrms (AC)

Fonte: Yokogawa (2021).

Por fim, as sondas foram instaladas junto às conexões de entrada dos disjuntores gerais dos QGBTs ativos, conforme

Figura 27, na configuração *three phases four wires* (3P4W), tensão máxima de 600 V, corrente máxima de 1.000 A e integração de 10 minutos. Como havia apenas um analisador disponível, as grandezas elétricas de cada quadro foram medidas em datas distintas, durante aproximadamente sete dias e totalizando mais que 1008 leituras, seguindo as recomendações do Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2021).

Figura 27 – Analisador instalado junto ao disjuntor geral do QGBT 4



Fonte: Elaboração própria (2026).

3.4 Análises de energia elétrica

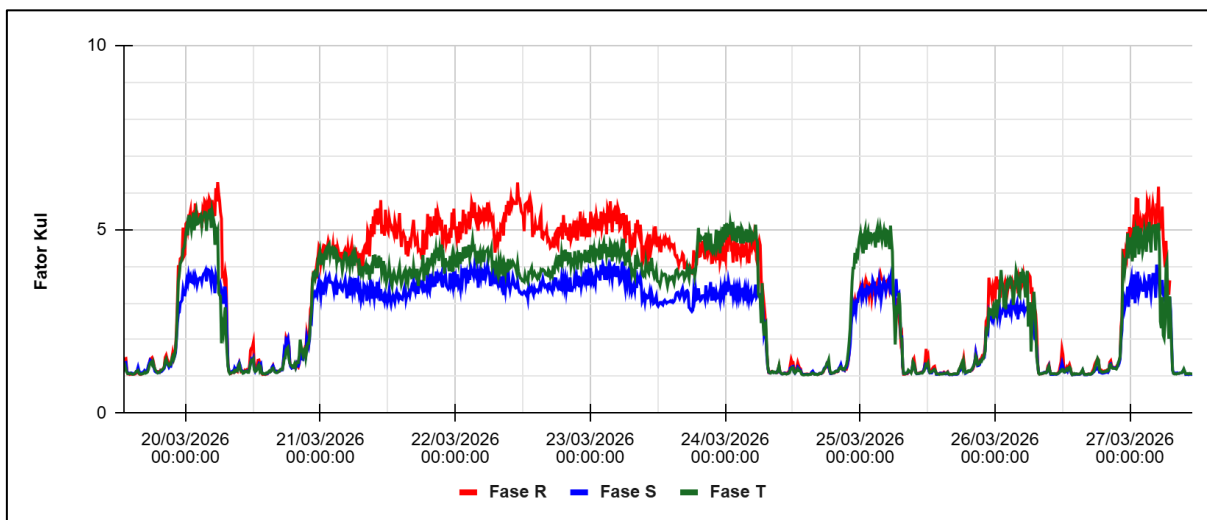
As análises de energia realizadas são apresentadas por quadro elétrico, nas quais foram obtidos os valores eficazes das harmônicas de corrente para as fases R, S e T e potências aparentes solicitadas. Os cálculos e gráficos foram realizados com o auxílio de planilhas eletrônicas. No presente trabalho, são estudadas apenas as componentes harmônicas de ordem ímpar, pois, a partir das análises realizadas, verificou-se que as componentes de ordem par apresentavam valores médios inferiores a 1 A.

3.4.1 Quadro de baixa tensão do transformador 2

As medições das grandezas elétricas junto ao QGBT 2 foram realizadas entre os dias 19 e 27 de março de 2026, sendo dia 23 de março feriado municipal, totalizando 1.141 amostras.

Dada a norma UL 1561 e por meio da Equação 28, calcula-se o valor de K_{UL} para cada fase e amostra da análise de energia, cujos resultados são apresentados na Figura 28. O valor máximo e mínimo obtidos são apresentados no Quadro 6.

Figura 28 – Fator Kul durante análise para o transformador 2 (UL 1561)



Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 6 – Valores máximos e mínimos do fator Kul para o transformador 2 (UL 1561)

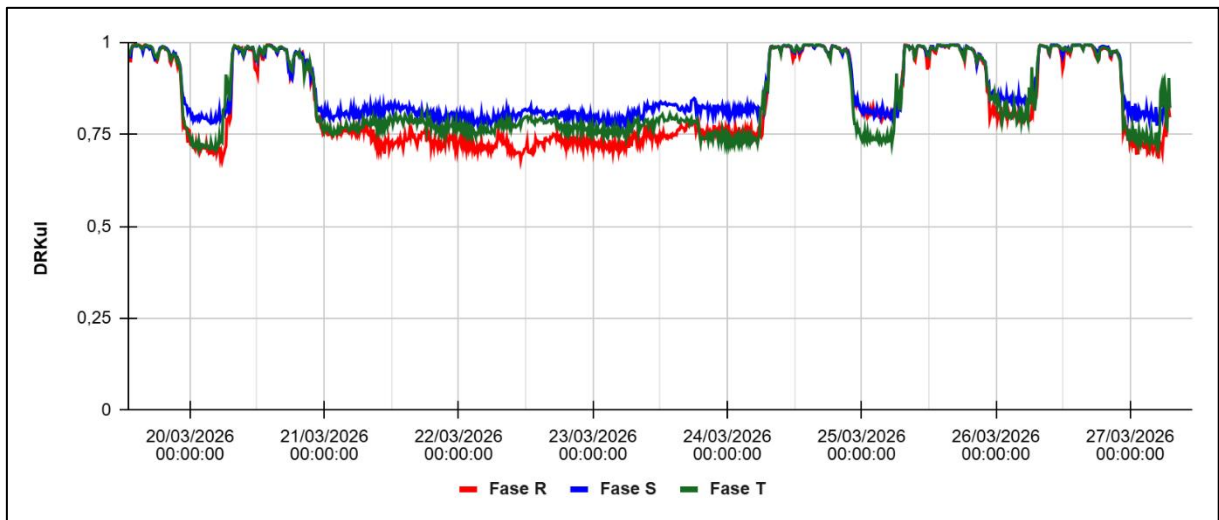
Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	Fator Kul	Dia Hora	Fator Kul
R	20/03 05:45	6,29	26/03 13:45	1,05
S	23/03 05:55	4,13	26/03 13:45	1,05
T	20/03 04:25	5,53	24/03 13:55	1,04

Fonte: Elaboração própria (2026).

Utiliza-se, então, as Equações 24, 27, 31 e 32, o Anexo A, considerando que as condições construtivas do transformador 2 e 4 são semelhantes, e o Anexo B. Dessa forma, obtém-se o valor médio de e igual a 0,28, a partir da média das R_{cc} medidas durante a manutenção realizada na subestação. A desclassificação DRK_{UL} é

calculada por meio da Equação 30 para cada fase e amostra do transformador 2, resultando na Figura 29. Os valores máximos e mínimos são apresentados no Quadro 7.

Figura 29 – DRKul durante análise para o transformador 2 (UL 1561)



Fonte: Elaboração própria (2026).

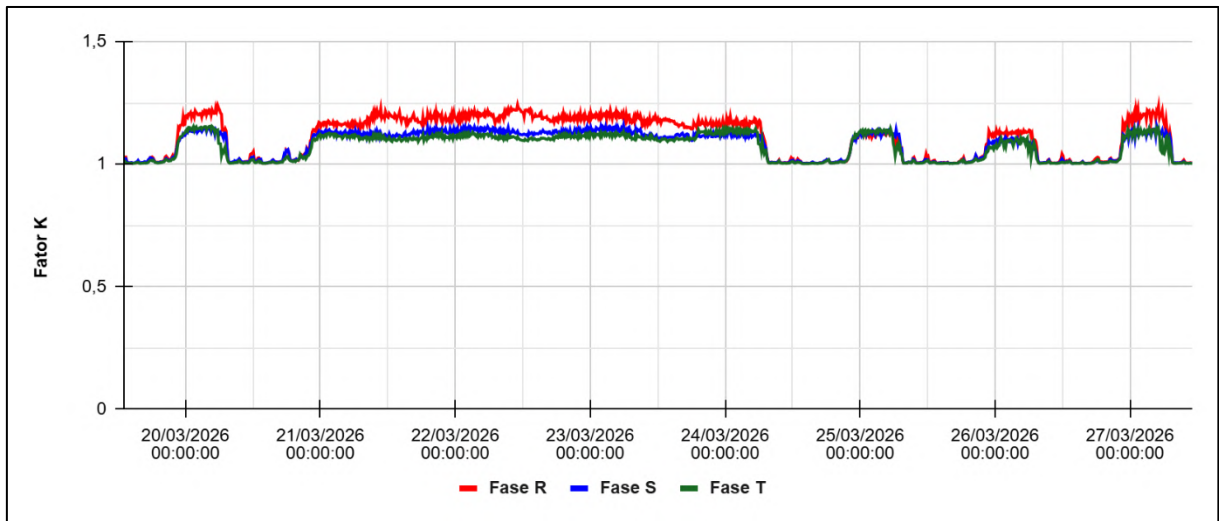
Quadro 7 – Valores máximos e mínimos do DRKul para o transformador 2 (UL 1561)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	DRKul	Dia Hora	DRKul
R	26/03 13:45	0,99	20/03 05:45	0,68
S	26/03 13:45	1,00	23/03 05:55	0,77
T	24/03 13:55	1,00	20/03 04:25	0,71

Fonte: Elaboração própria (2026).

Dada a norma EN 50541-2 e por meio das Equações 24, 27, 31, 32 e 33, calcula-se o valor de K para cada fase e amostra da análise de energia, cujos resultados são apresentados na Figura 30. O valor máximo e mínimo obtidos são apresentados no Quadro 8.

Figura 30 – Fator K durante análise para o transformador 2 (EN 50541-2)



Fonte: Elaboração própria (2026).

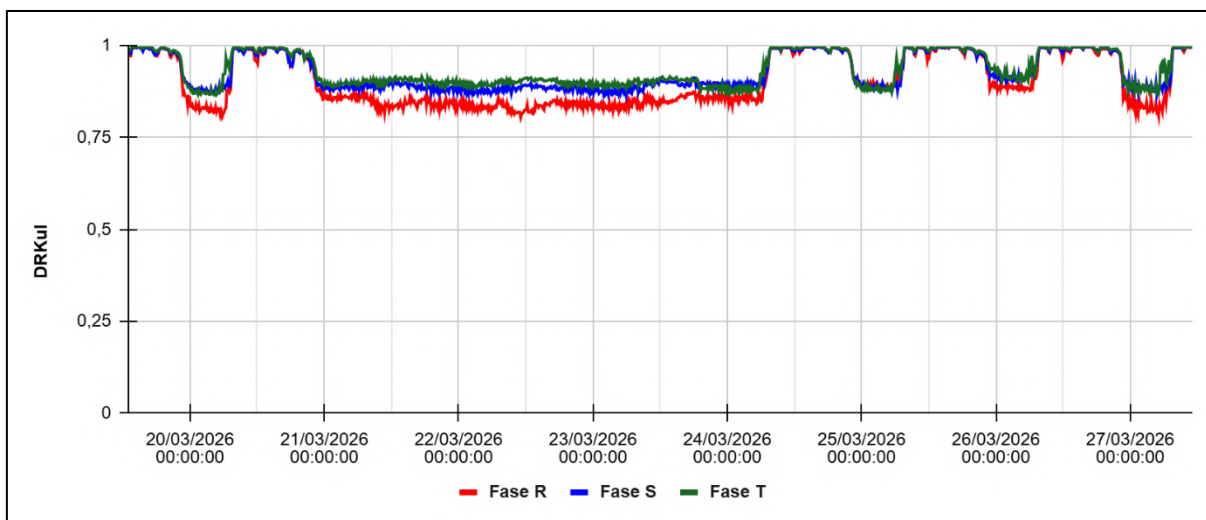
Quadro 8 – Valores máximos e mínimos do fator K para o transformador 2 (EN 50541-2)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	Fator K	Dia Hora	Fator K
R	22/03 11:05	1,24	20/03 14:15	1,00
S	23/03 05:55	1,16	26/03 13:45	1,00
T	20/03 04:25	1,16	24/03 13:55	1,00

Fonte: Elaboração própria (2026).

A desclassificação *DRK* é calculada por meio da Equação 34 para cada fase e amostra do transformador 2, resultando na Figura 31. Os valores máximos e mínimos são apresentados no Quadro 9.

Figura 31 – DRK durante análise para o transformador 2 (EN 50541-2)



Fonte: Elaboração própria (2026).

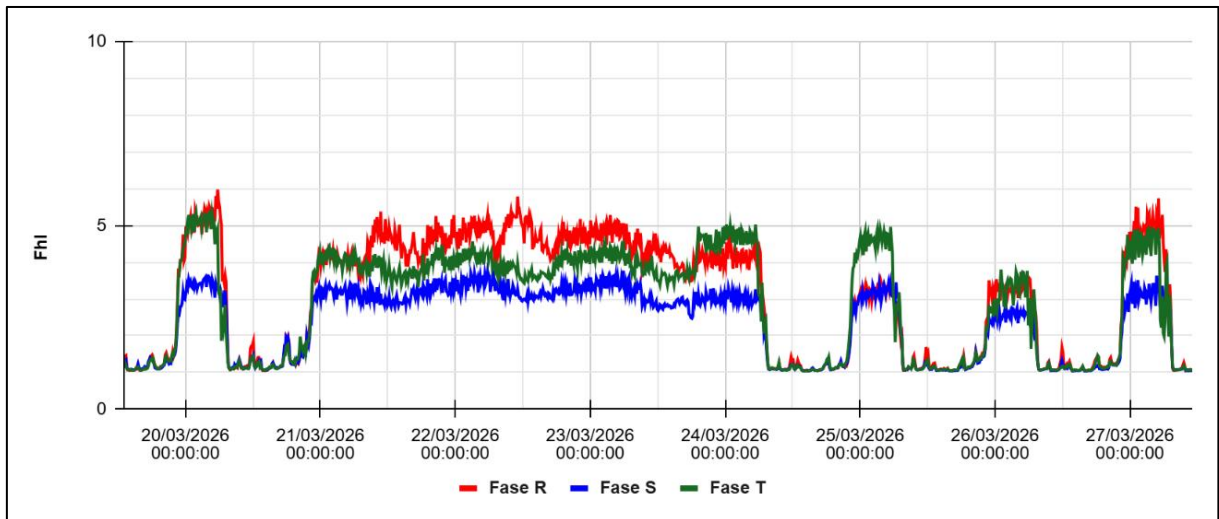
Quadro 9 – Valores máximos e mínimos do DRK para o transformador 2 (EN 50541-2)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	DRK	Dia Hora	DRK
R	20/03 14:15	1,00	22/03 11:05	0,81
S	26/03 13:45	1,00	23/03 05:55	0,86
T	24/03 13:55	1,00	20/03 04:25	0,87

Fonte: Elaboração própria (2026).

Dada a norma C57.110 e por meio da Equação 35, calcula-se o valor de F_{HL} para cada fase e amostra da análise de energia, cujos resultados são apresentados na Figura 32. O valor máximo e mínimo obtidos são apresentados no Quadro 10.

Figura 32 – Fator Fhl durante análise para o transformador 2 (C57.110)



Fonte: Elaboração própria (2026).

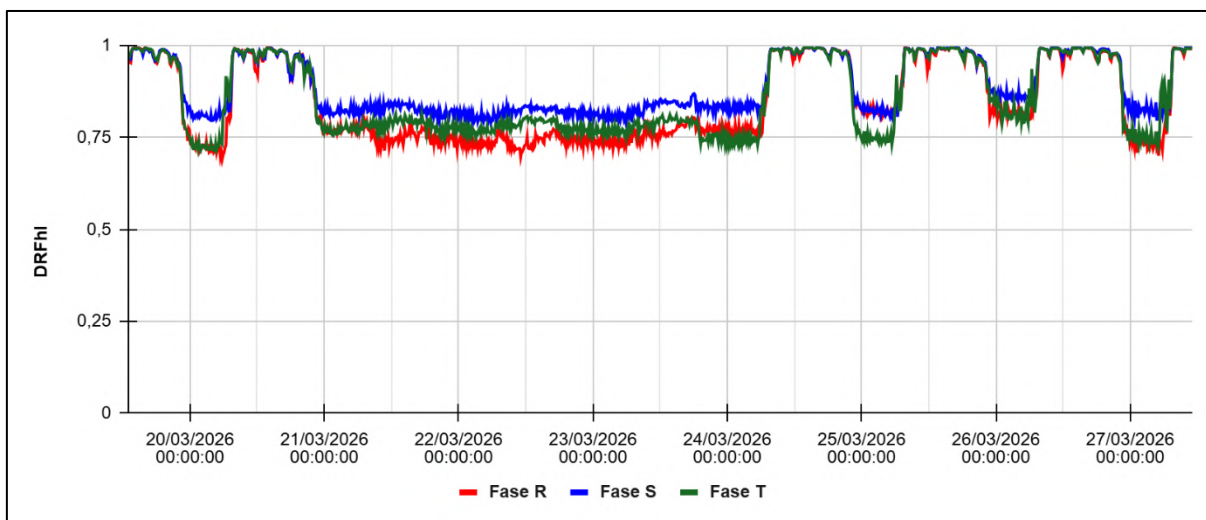
Quadro 10 – Valores máximos e mínimos do fator Fhl para o transformador 2 (C57.110)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	Fator Fhl	Dia Hora	Fator Fhl
R	20/03 05:45	5,98	20/03 14:15	1,05
S	23/03 05:55	3,77	26/03 13:45	1,04
T	20/03 04:25	5,38	24/03 13:55	1,04

Fonte: Elaboração própria (2026).

A desclassificação DRF_{HL} é calculada por meio da Equação 36, para cada fase e amostra do transformador 2, resultando na Figura 33. Os valores máximos e mínimos são apresentados no Quadro 11.

Figura 33 – DRFhl durante análise para o transformador 2 (C57.110)



Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 11 – Valores máximos e mínimos do DRFhl para o transformador 2 (C57.110)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	DRFhl	Dia Hora	DRFhl
R	20/03 14:15	0,99	20/03 05:45	0,69
S	26/03 13:45	1,00	23/03 05:55	0,79
T	24/03 13:55	1,00	20/03 04:25	0,71

Fonte: Elaboração própria (2026).

O Quadro 12 e o Quadro 13 apresentam um resumo dos valores máximos e mínimos obtidos para o fator K_{UL} , K e F_{HL} e as desclassificações DRK_{UL} , DRK e DRF_{HL} , respectivamente.

Quadro 12 – Resumo dos valores máximos e mínimos dos fatores para o transformador 2

Fase	Valores máximos						Valores mínimos					
	Fator K_{UL}		Fator K		Fator F_{HL}		Fator K_{UL}		Fator K		Fator F_{HL}	
	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor
R	20/03 05:45	6,29	22/03 11:05	1,24	20/03 05:45	5,98	26/03 13:45	1,05	20/03 14:15	1,00	20/03 14:15	1,05
S	23/03 05:55	4,13	23/03 05:55	1,16	23/03 05:55	3,77	26/03 13:45	1,05	26/03 13:45	1,00	26/03 13:45	1,04
T	20/03 04:25	5,53	20/03 04:25	1,16	20/03 04:25	5,38	24/03 13:55	1,04	24/03 13:55	1,00	24/03 13:55	1,04

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 13 – Resumo dos valores máximos e mínimos das desclassificações para o transformador 2

Fase	Valores máximos						Valores mínimos					
	DRK_{UL}		DRK		DRF_{HL}		DRK_{UL}		DRK		DRF_{HL}	
	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor
R	26/03 13:45	0,99	20/03 14:15	1,00	20/03 14:15	0,99	20/03 05:45	0,68	22/03 11:05	0,81	20/03 05:45	0,69
S	26/03 13:45	1,00	26/03 13:45	1,00	26/03 13:45	1,00	23/03 05:55	0,77	23/03 05:55	0,86	23/03 05:55	0,79
T	24/03 13:55	1,00	24/03 13:55	1,00	24/03 13:55	1,00	20/03 04:25	0,71	20/03 04:25	0,87	20/03 04:25	0,71

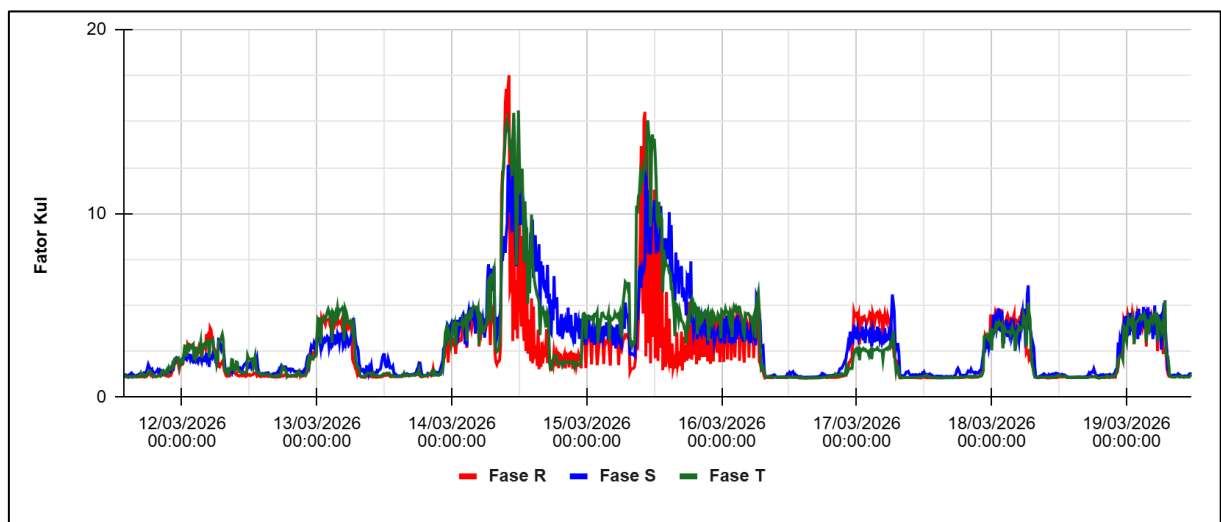
Fonte: Elaboração própria (2026).

3.4.2 Quadro de baixa tensão do transformador 3

As medições das grandezas elétricas junto ao QGBT 3 foram realizadas entre os dias 11 e 19 de março de 2026, totalizando 1.140 amostras.

Dada a norma UL 1561 e por meio da Equação 28, calcula-se o valor de K_{UL} para cada fase e amostra da análise de energia, cujos resultados são apresentados na Figura 34. O valor máximo e mínimo obtidos são apresentados no Quadro 14.

Figura 34 – Fator Kul durante análise para o transformador 3 (UL 1561)



Fonte: Elaboração própria (2026).

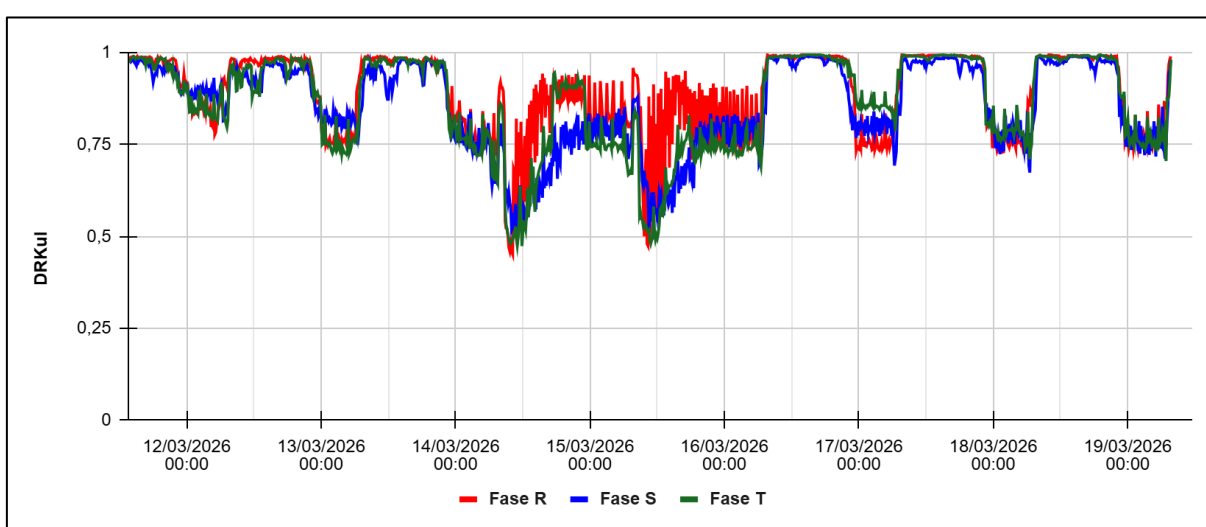
Quadro 14 – Valores máximos e mínimos do fator Kul para o transformador 3 (UL 1561)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	Fator Kul	Dia Hora	Fator Kul
R	14/03 10:11	17,52	16/03 14:31	1,04
S	15/03 10:31	12,95	16/03 14:51	1,08
T	14/03 11:51	15,61	16/03 14:51	1,04

Fonte: Elaboração própria (2026).

Utiliza-se, então, as Equações 24, 27, 31 e 32, o Anexo A, considerando que as condições construtivas do transformador 3 e 4 são semelhantes, e o Anexo B. Dessa forma, obtém-se o valor médio de e igual a 0,31, a partir da média das R_{cc} medidas durante a manutenção realizada na subestação. A desclassificação DRK_{UL} é calculada por meio da Equação 30 para cada fase e amostra do transformador 3, resultando na Figura 35. Os valores máximos e mínimos são apresentados no Quadro 15.

Figura 35 – DRKul durante análise para o transformador 3 (UL 1561)



Fonte: Elaboração própria (2026).

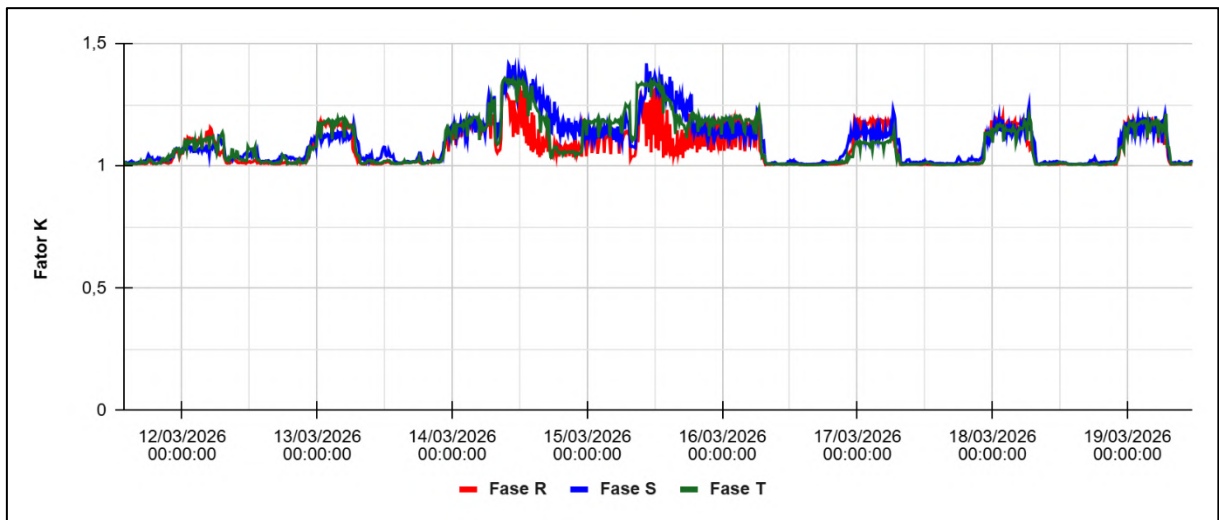
Quadro 15 – Valores máximos e mínimos do DRKul para o transformador 3 (UL 1561)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	DRKul	Dia Hora	DRKul
R	16/03 14:31	1,00	14/03 10:11	0,45
S	16/03 14:51	0,99	15/03 10:31	0,51
T	16/03 14:51	1,00	14/03 11:51	0,47

Fonte: Elaboração própria (2026).

Dada a norma EN 50541-2 e por meio das Equações 24, 27, 31, 32 e 33, calcula-se o valor de K , referente à norma EN 50541-2, para cada fase e amostra da análise de energia, cujos resultados são apresentados na Figura 36. O valor máximo e mínimo obtidos são apresentados no Quadro 16.

Figura 36 – Fator K durante análise para o transformador 3 (EN 50541-2)



Fonte: Elaboração própria (2026).

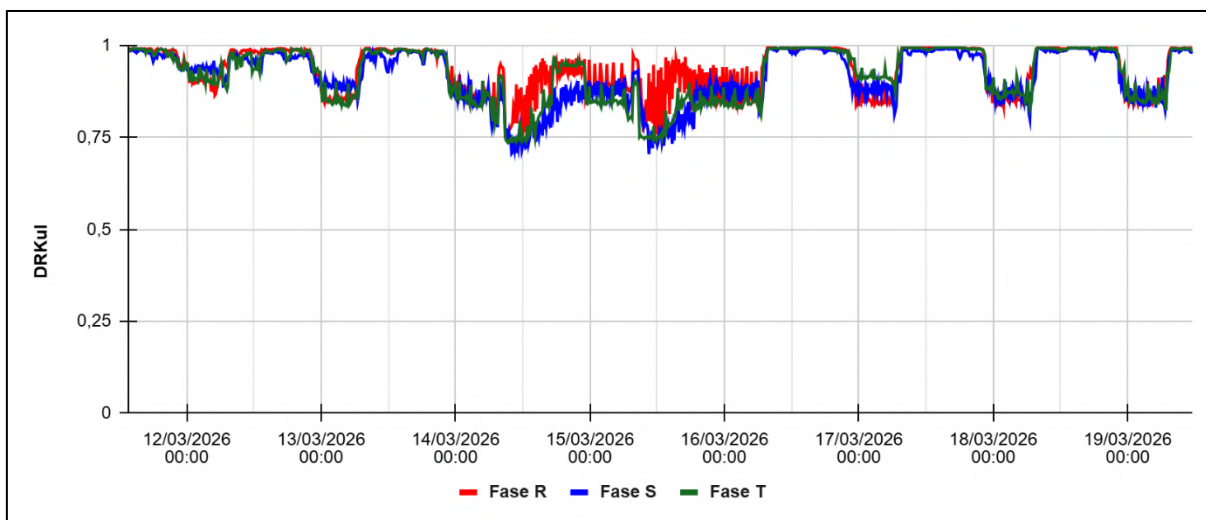
Quadro 16 – Valores máximos e mínimos do fator K para o transformador 3 (EN 50541-2)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	Fator K	Dia Hora	Fator K
R	14/03 09:01	1,34	18/03 10:01	1,00
S	15/03 10:31	1,42	16/03 14:51	1,01
T	14/03 09:21	1,36	16/03 14:51	1,00

Fonte: Elaboração própria (2026).

A desclassificação DRK é calculada por meio da Equação 34, para cada fase e amostra do transformador 3, resultando na Figura 37. Os valores máximos e mínimos são apresentados no Quadro 17.

Figura 37 – DRK durante análise para o transformador 3 (EN 50541-2)



Fonte: Elaboração própria (2026).

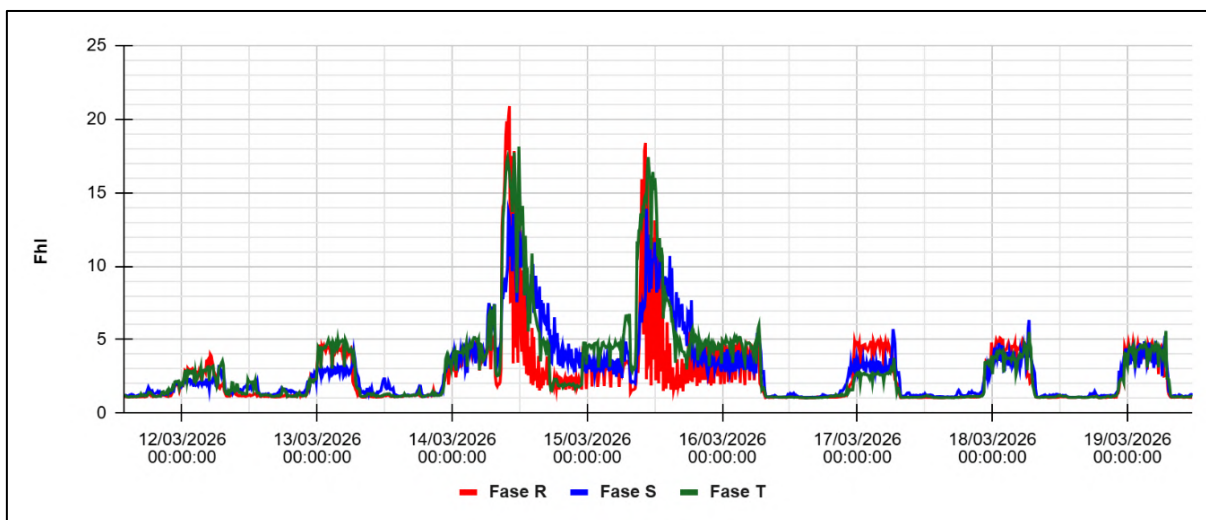
Quadro 17 – Valores máximos e mínimos do DRK para o transformador 3 (EN 50541-2)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	DRK	Dia Hora	DRK
R	18/03 10:01	1,00	14/03 09:01	0,75
S	16/03 14:51	0,99	15/03 10:31	0,70
T	16/03 14:51	1,00	14/03 09:21	0,74

Fonte: Elaboração própria (2026).

Dada a norma C57.110 e por meio da Equação 35, calcula-se o valor de F_{HL} , referente à norma C57.110, para cada fase e amostra da análise de energia, cujos resultados são apresentados na Figura 38. O valor máximo e mínimo obtidos são apresentados no Quadro 18.

Figura 38 – Fator Fhl durante análise para o transformador 3 (C57.110)



Fonte: Elaboração própria (2026).

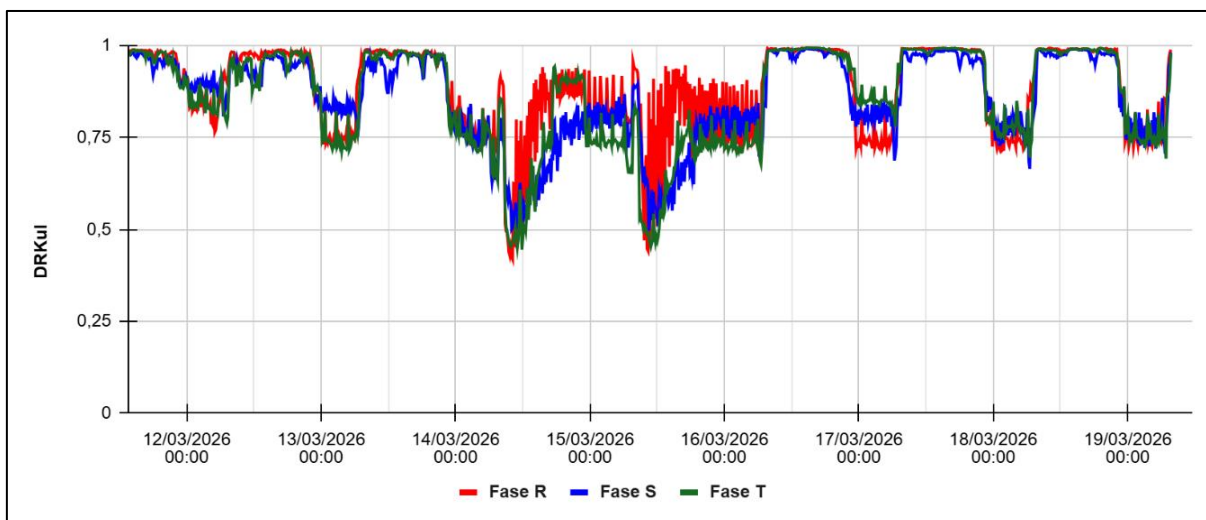
Quadro 18 – Valores máximos e mínimos do fator Fhl para o transformador 3 (C57.110)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	Fator Fhl	Dia Hora	Fator Fhl
R	14/03 10:11	20,89	16/03 14:41	1,05
S	15/03 10:31	13,91	16/03 14:41	1,07
T	14/03 11:51	18,13	16/03 14:51	1,05

Fonte: Elaboração própria (2026).

A desclassificação DRF_{HL} é calculada por meio da Equação 36, para cada fase e amostra do transformador 3, resultando na Figura 39. Os valores máximos e mínimos são apresentados no Quadro 19.

Figura 39 – DRFhl durante análise para o transformador 3 (C57.110)



Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 19 – Valores máximos e mínimos do DRFhl para o transformador 3 (C57.110)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	DRFhl	Dia Hora	DRFhl
R	16/03 14:41	0,99	14/03 10:11	0,42
S	16/03 14:41	0,99	15/03 10:31	0,50
T	16/03 14:41	0,99	14/03 11:51	0,45

Fonte: Elaboração própria (2026).

O Quadro 20 e o Quadro 21 apresentam um resumo dos valores máximos e mínimos obtidos para o fator K_{UL} , K e F_{HL} e as desclassificações DRK_{UL} , DRK e DRF_{HL} , respectivamente.

Quadro 20 – Resumo dos valores máximos e mínimos dos fatores para o transformador 3

Fase	Valores máximos						Valores mínimos					
	Fator K_{UL}		Fator K		Fator F_{HL}		Fator K_{UL}		Fator K		Fator F_{HL}	
	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor
R	14/03 10:11	17,52	14/03 09:01	1,34	14/03 10:11	20,89	16/03 14:31	1,04	18/03 10:01	1,00	16/03 14:41	1,05
S	15/03 10:31	12,95	15/03 10:31	1,42	15/03 10:31	13,91	16/03 14:51	1,08	16/03 14:51	1,01	16/03 14:41	1,07
T	14/03 11:51	15,61	14/03 09:21	1,36	14/03 11:51	18,13	16/03 14:51	1,04	16/03 14:51	1,00	16/03 14:51	1,05

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 21 – Resumo dos valores máximos e mínimos das desclassificações para o transformador 3

Fase	Valores máximos						Valores mínimos					
	DRK_{UL}		DRK		DRF_{HL}		DRK_{UL}		DRK		DRF_{HL}	
	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor
R	16/03 14:31	1,00	18/03 10:01	1,00	16/03 14:41	0,99	14/03 10:11	0,45	14/03 09:01	0,75	14/03 10:11	0,42
S	16/03 14:51	0,99	16/03 14:51	0,99	16/03 14:41	0,99	15/03 10:31	0,51	15/03 10:31	0,70	15/03 10:31	0,50
T	16/03 14:51	1,00	16/03 14:51	1,00	16/03 14:41	0,99	14/03 11:51	0,47	14/03 09:21	0,74	14/03 11:51	0,45

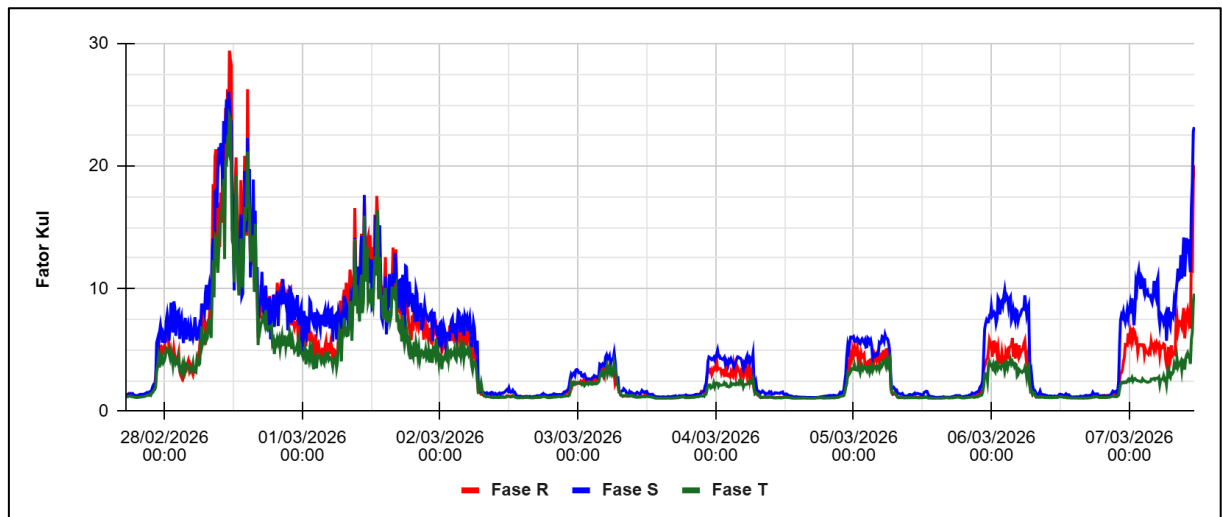
Fonte: Elaboração própria (2026).

3.4.3 Quadro de baixa tensão do transformador 4

As medições das grandezas elétricas junto ao QGBT 4 foram realizadas entre os dias 27 de fevereiro e 07 de março de 2026, totalizando 1.117 amostras.

Dada a norma UL 1561 e por meio da Equação 28, calcula-se o valor de K_{UL} para cada fase e amostra da análise de energia, cujos resultados são apresentados na Figura 40. O valor máximo e mínimo obtidos são apresentados no Quadro 22.

Figura 40 – Fator Kul durante análise para o transformador 4 (UL 1561)



Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 22 – Valores máximos e mínimos do fator Kul para o transformador 4 (UL 1561)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	Fator Kul	Dia Hora	Fator Kul
R	28/02 11:19	29,43	03/03 14:19	1,07
S	28/02 11:09	26,08	04/03 17:19	1,11
T	28/02 11:19	24,09	04/03 16:39	1,06

Fonte: Elaboração própria (2026).

Utiliza-se, então, as Equações 24, 27, 31 e 32, o Anexo A e o Anexo B. Dessa forma, obtém-se o valor médio de e igual a 0,35, a partir da média das R_{cc} medidas durante a manutenção realizada na subestação. A desclassificação DRK_{UL} é calculada por meio da Equação 30 para cada fase e amostra do transformador 4, resultando na Figura 41. Os valores máximos e mínimos são apresentados no Quadro 23.

Figura 41 – DRKul durante análise para o transformador 4 (UL 1561)



Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 23 – Valores máximos e mínimos do DRKul para o transformador 4 (UL 1561)

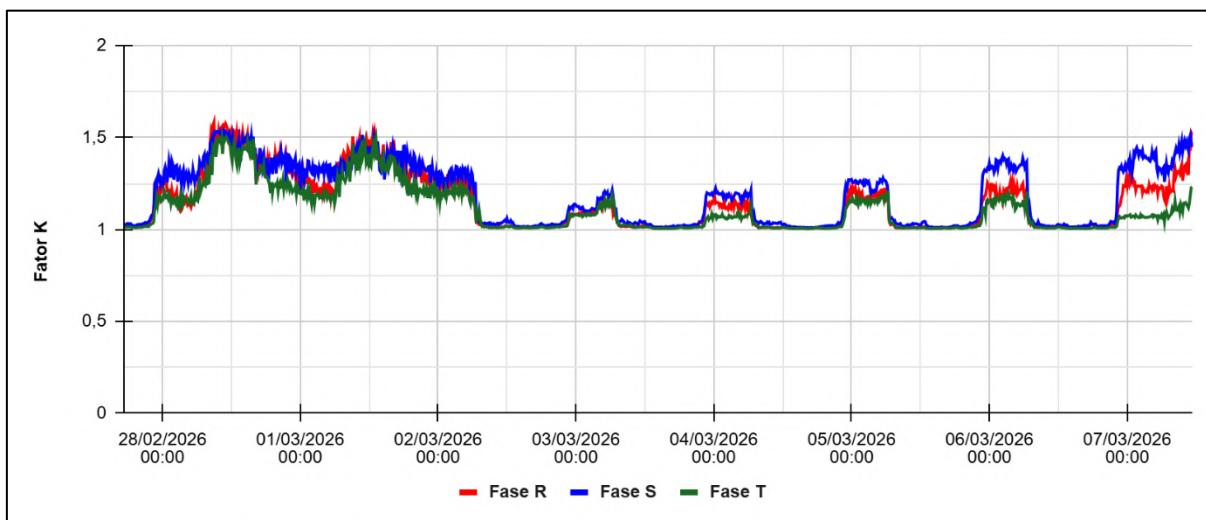
Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	DRKul	Dia Hora	DRKul
R	03/03 14:19	0,99	28/02 11:19	0,35
S	04/03 17:19	0,99	28/02 11:09	0,37
T	04/03 16:39	0,99	28/02 11:19	0,38

Fonte: Elaboração própria (2026).

Dada a norma EN 50541-2 e por meio das Equações 24, 27, 31, 32 e 33, calcula-se o valor de K para cada fase e amostra da análise de energia, cujos

resultados são apresentados na Figura 42. O valor máximo e mínimo obtidos são apresentados no Quadro 24.

Figura 42 – Fator K durante análise para o transformador 4 (EN 50541-2)



Fonte: Elaboração própria (2026).

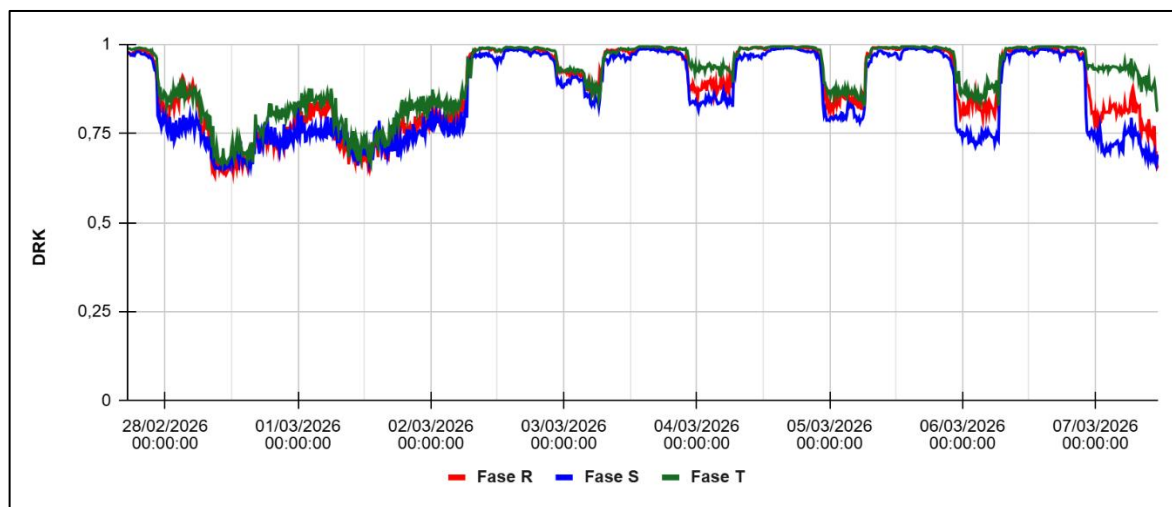
Quadro 24 – Valores máximos e mínimos do fator K para o transformador 4 (EN 50541-2)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	Fator K	Dia Hora	Fator K
R	28/02 08:59	1,58	03/03 13:59	1,01
S	28/02 09:59	1,54	04/03 17:19	1,01
T	28/02 11:09	1,50	04/03 15:59	1,00

Fonte: Elaboração própria (2026).

A desclassificação *DRK* é calculada por meio da Equação 34, para cada fase e amostra do transformador 4, resultando na Figura 43. Os valores máximos e mínimos são apresentados no Quadro 25.

Figura 43 – DRK durante análise para o transformador 4 (EN 50541-2)



Fonte: Elaboração própria (2026).

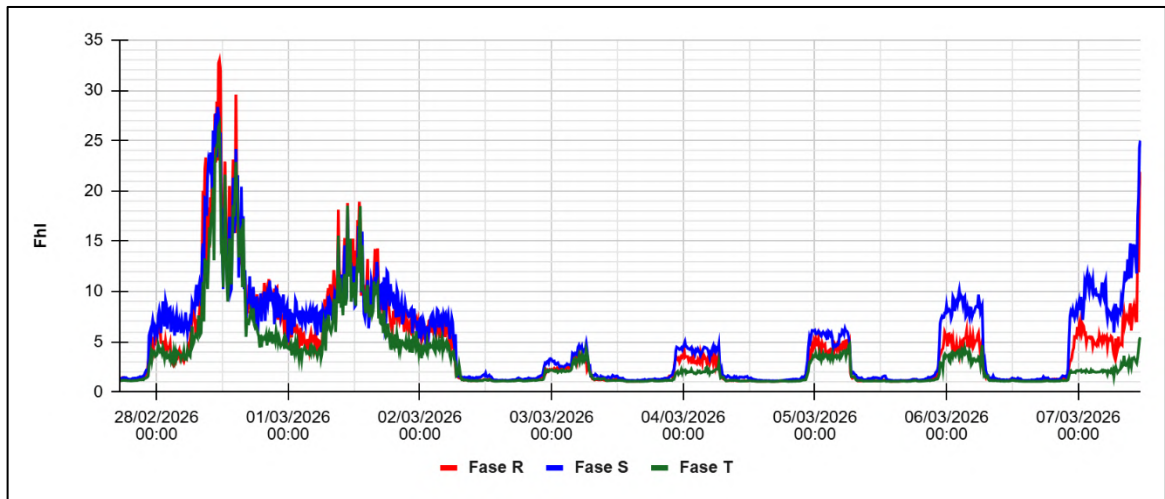
Quadro 25 – Valores máximos e mínimos do DRK para o transformador 4 (EN 50541-2)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	DRK	Dia Hora	DRK
R	03/03 13:59	0,99	28/02 08:59	0,63
S	04/03 17:19	0,99	28/02 09:59	0,65
T	04/03 15:59	1,00	28/02 11:09	0,66

Fonte: Elaboração própria (2026).

Dada a norma C57.110 e por meio da Equação 35, calcula-se o valor de F_{HL} para cada fase e amostra da análise de energia, cujos resultados são apresentados na Figura 44. O valor máximo e mínimo obtidos são apresentados no Quadro 26.

Figura 44 – Fator Fhl durante análise para o transformador 4 (C57.110)



Fonte: Elaboração própria (2026).

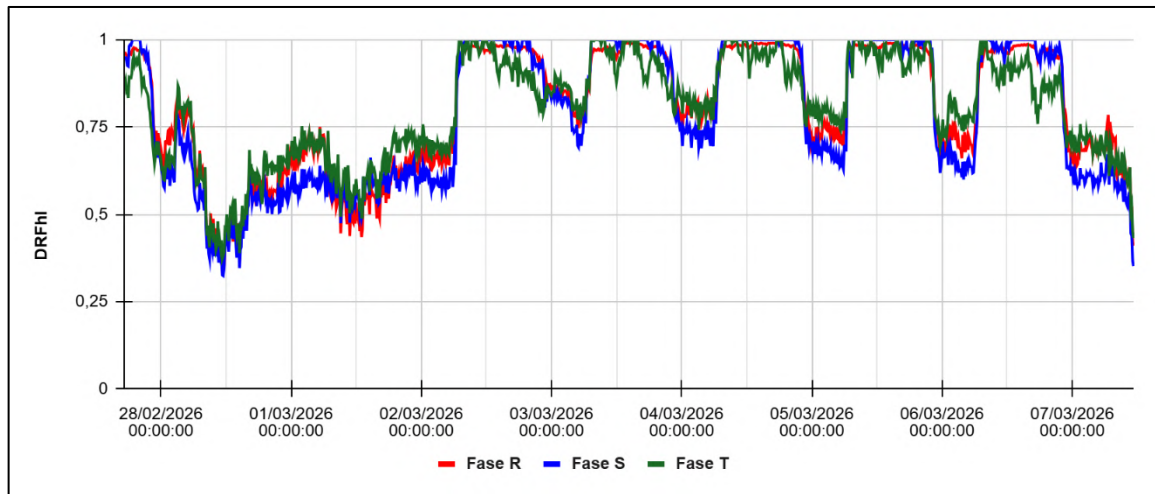
Quadro 26 – Valores máximos e mínimos do fator Fhl para o transformador 4 (C57.110)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	Fator Fhl	Dia Hora	Fator Fhl
R	28/02 11:29	33,03	03/03 13:59	1,07
S	28/02 11:09	28,36	04/03 17:19	1,11
T	28/02 11:29	26,64	04/03 15:59	1,05

Fonte: Elaboração própria (2026).

A desclassificação DRF_{HL} é calculada por meio da Equação 36, para cada fase e amostra do transformador 2, resultando na Figura 45. Os valores máximos e mínimos são apresentados no Quadro 27.

Figura 45 – DRFhl durante análise para o transformador 4 (C57.110)



Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 27 – Valores máximos e mínimos do DRF_{hl} para o transformador 4 (C57.110)

Fase	Valores máximos		Valores mínimos	
	Dia Hora	DRF_{hl}	Dia Hora	DRF_{hl}
R	03/03 13:59	0,99	28/02 11:19	0,33
S	04/03 17:19	0,99	28/02 11:29	0,35
T	04/03 15:59	0,99	28/02 11:19	0,36

Fonte: Elaboração própria (2026).

O Quadro 28 e o Quadro 29 apresentam um resumo dos valores máximos e mínimos obtidos para o fator K_{UL} , K e F_{HL} e as desclassificações DRK_{UL} , DRK e DRF_{HL} , respectivamente.

Quadro 28 – Resumo dos valores máximos e mínimos dos fatores para o transformador 4

Fase	Valores máximos						Valores mínimos					
	Fator K_{UL}		Fator K		Fator F_{HL}		Fator K_{UL}		Fator K		Fator F_{HL}	
	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor
R	28/02 11:19	29,43	28/02 08:59	1,58	28/02 11:29	33,03	03/03 14:19	1,07	03/03 13:59	1,01	03/03 13:59	1,07
S	28/02 11:09	26,08	28/02 09:59	1,54	28/02 11:09	28,36	04/03 17:19	1,11	04/03 17:19	1,01	04/03 17:19	1,11
T	28/02 11:19	24,09	28/02 11:09	1,50	28/02 11:29	26,64	04/03 16:39	1,06	04/03 15:59	1,00	04/03 15:59	1,05

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 29 – Resumo dos valores máximos e mínimos das desclassificações para o transformador 4

Fase	Valores máximos						Valores mínimos					
	DRK_{UL}		DRK		DRF_{HL}		DRK_{UL}		DRK		DRF_{HL}	
	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor	Dia Hora	Valor
R	03/03 14:19	0,99	03/03 13:59	0,99	03/03 14:19	0,99	28/02 11:19	0,35	28/02 08:59	0,63	28/02 11:19	0,33
S	04/03 17:19	0,99	04/03 17:19	0,99	27/02 18:49	1,00	28/02 11:09	0,37	28/02 09:59	0,65	28/02 11:29	0,35
T	04/03 16:39	0,99	04/03 15:59	1,00	02/03 06:59	1,00	28/02 11:19	0,38	28/02 11:09	0,66	28/02 11:19	0,36

Fonte: Elaboração própria (2026).

4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADOS

A análise comparativa entre os resultados abrange a avaliação entre diferentes normas, fatores, níveis de carga e transformadores, além de incluir uma breve análise dos harmônicos de corrente referentes aos anos de 2023 e 2026.

4.1 Comparação entre normas

Ao comparar os fatores K_{UL} , K e F_{HL} para um mesmo transformador, têm-se o Quadro 12, Quadro 20 e Quadro 28. Uma vez que a norma EN 50541-2 considera e em seu cálculo, a comparação direta dos resultados não é possível. Por sua vez, o Quadro 13, Quadro 21 e Quadro 29 apresentam os valores de desclassificação DRK_{UL} , DRK e DRF_{HL} , no qual é possível realizar a comparação direta, visto que as normas UL 1561, EN 50541-2 e C57.110 utilizaram e em algum momento do equacionamento.

Verifica-se que, para os valores mínimos de desclassificação analisados, a norma UL 1561 resultou em uma avaliação mais conservadora para o transformador 2, ou seja, apresentou uma maior limitação da potência aparente máxima que pode ser utilizada sem que ocorra sobreaquecimento. Em contrapartida, para os transformadores 3 e 4, os resultados mais conservadores foram obtidos por meio da norma C57.110. Adicionalmente, a desclassificação calculada pelo fator DRK (EN 50541-2) foi a menos conservadora para os três transformadores.

Durante o trabalho, observou-se que o cálculo do fator K_{UL} e F_{HL} são mais fáceis de obter quando não se dispõe de informações dos transformadores, como as resistências elétricas equivalentes das perdas totais e medidas em corrente contínua. Como os transformadores a secos podem indicar em sua placa de identificação o fator K recomendável para sua instalação, a norma UL 1561 e o Quadro 3 mostram-se como uma forma mais rápida de dimensionamento.

No entanto, caso o transformador instalado na subestação não possua classificação quanto às componentes harmônicas de corrente em sua placa de identificação, faz-se necessário calcular sua desclassificação e, portanto, estimar suas

perdas por correntes parasitas e por efeito Joule. Devido aos resultados mais conservadores obtidos, a C57.110 mostra-se mais recomendada para esses casos. Embora se diferencie da UL 1561 no cálculo do fator K, a C57.110 apresenta metodologia muito semelhante para o cálculo da desclassificação. Caso não seja necessário um resultado tão conservador, a EN 50541-2 pode ser utilizada como via para o dimensionamento.

4.2 Comparação entre fatores, níveis de carga e transformadores

Dado os valores máximos e ao comparar a mesma norma para os transformadores, têm-se o Quadro 30, o Quadro 31 e o Quadro 32.

Quadro 30 – Valores máximos do fator K_{UL} para os transformadores (UL 1561)

Fase	Transformador 2		Transformador 3		Transformador 4	
	Dia Hora	K_{UL}	Dia Hora	K_{UL}	Dia Hora	K_{UL}
R	20/03 05:45	6,29	14/03 10:11	17,52	28/02 11:19	29,43
S	23/03 05:55	4,13	15/03 10:31	12,95	28/02 11:09	26,08
T	20/03 04:25	5,53	14/03 11:51	15,61	28/02 11:19	24,09

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 31 – Valores máximos do fator K para os transformadores (EN 50541-2))

Fase	Transformador 2		Transformador 3		Transformador 4	
	Dia Hora	K	Dia Hora	K	Dia Hora	K
R	22/03 11:05	1,24	14/03 09:01	1,34	28/02 08:59	1,58
S	23/03 05:55	1,16	15/03 10:31	1,42	28/02 09:59	1,54
T	20/03 04:25	1,16	14/03 09:21	1,36	28/02 11:09	1,50

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 32 – Valores máximos do fator F_{HL} para os transformadores (C57.110)

Fase	Transformador 2		Transformador 3		Transformador 4	
	Dia Hora	F_{HL}	Dia Hora	F_{HL}	Dia Hora	F_{HL}
R	20/03 05:45	5,98	14/03 10:11	20,89	28/02 11:29	33,03
S	23/03 05:55	3,77	15/03 10:31	13,91	28/02 11:09	28,36
T	20/03 04:25	5,38	14/03 11:51	18,13	28/02 11:29	26,64

Fonte: Elaboração própria (2026).

O Quadro 33, Quadro 34 e Quadro 35 apresenta os valores de desclassificação associados aos fatores máximos obtidos anteriormente, bem como o limite de potência, considerando a potência nominal de 166,67 kVA por fase.

Quadro 33 – Valores de DRKul para os transformadores (UL 1561)

Fase	Transformador 2			Transformador 3			Transformador 4		
	Dia Hora	DRKul	Limite (kVA)	Dia Hora	DRKul	Limite (kVA)	Dia Hora	DRKul	Limite (kVA)
R	20/03 05:45	0,68	113,34	14/03 10:11	0,45	75,00	28/02 11:19	0,35	58,33
S	23/03 05:55	0,77	128,34	15/03 10:31	0,51	85,00	28/02 11:09	0,37	61,67
T	20/03 04:25	0,71	118,34	14/03 11:51	0,47	78,33	28/02 11:19	0,38	63,33

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 34 – Valores de DRK para os transformadores (EN 50541-2)

Fase	Transformador 2			Transformador 3			Transformador 4		
	Dia Hora	DRK	Limite (kVA)	Dia Hora	DRK	Limite (kVA)	Dia Hora	DRK	Limite (kVA)
R	22/03 11:05	0,81	135,00	14/03 09:01	0,75	125,00	28/02 08:59	0,63	105,00
S	23/03 05:55	0,86	143,34	15/03 10:31	0,70	116,67	28/02 09:59	0,65	108,34
T	20/03 04:25	0,87	145,00	14/03 09:21	0,74	123,34	28/02 11:09	0,66	110,00

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 35 – Valores de DRFhl para os transformadores (C57.110)

Fase	Transformador 2			Transformador 3			Transformador 4		
	Dia Hora	DRFhl	Limite (kVA)	Dia Hora	DRFhl	Limite (kVA)	Dia Hora	DRFhl	Limite (kVA)
R	20/03 05:45	0,69	115,00	14/03 10:11	0,42	70,00	28/02 11:29	0,33	55,00
S	22/03 11:05	0,79	131,67	15/03 10:31	0,50	83,34	28/02 11:09	0,35	58,33
T	20/03 06:25	0,71	118,34	14/03 11:51	0,45	75,00	28/02 11:29	0,36	60,00

Fonte: Elaboração própria (2026).

O Quadro 36, Quadro 37 e Quadro 38 compara os valores obtidos acima com a potência aparente média solicitada pelas cargas medida no mesmo instante, a fim de verificar se há a ocorrência de ultrapassagem desses limites.

Quadro 36 – Valores limites de DRKul e medidos para os transformadores (UL 1561)

Fase	Transformador 2			Transformador 3			Transformador 4		
	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)
R	20/03 05:45	113,34	10,76	14/03 10:11	75,00	3,90	28/02 11:19	58,33	3,57
S	23/03 05:55	128,34	13,28	15/03 10:31	85,00	3,27	28/02 11:09	61,67	4,04
T	20/03 04:25	118,34	10,60	14/03 11:51	78,33	2,23	28/02 11:19	63,33	3,61

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 37 – Valores limites de DRK e medidos para os transformadores (EN 50541-2)

Fase	Transformador 2			Transformador 3			Transformador 4		
	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)
R	22/03 11:05	135,00	9,34	14/03 09:01	125,00	2,12	28/02 08:59	105,00	4,36
S	23/03 05:55	143,34	13,28	15/03 10:31	116,67	3,27	28/02 09:59	108,34	4,30
T	20/03 04:25	145,00	10,6	14/03 09:21	123,34	2,46	28/02 11:09	110,00	3,83

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 38 – Valores limites de DRFhl e medidos para os transformadores (C57.110)

Fase	Transformador 2			Transformador 3			Transformador 4		
	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)
R	20/03 05:45	115,00	10,76	14/03 10:11	70,00	1,77	28/02 11:29	55,00	3,51
S	22/03 11:05	131,67	14,04	15/03 10:31	83,34	3,27	28/02 11:09	58,33	4,04
T	20/03 06:25	118,34	14,72	14/03 11:51	75,00	2,42	28/02 11:29	60,00	3,48

Fonte: Elaboração própria (2026).

Os transformadores 3 e 4 apresentaram os valores mais elevados de fator e desclassificação, com destaque para o transformador 4, que obteve os maiores resultados, sendo mais crítico. No entanto, esses valores mostraram-se mais expressivos durante períodos de baixa carga, como finais de semana e feriados, nos quais a potência aparente média solicitada permaneceu abaixo dos limites térmicos estabelecidos pelas normas, não trazendo riscos aos transformadores.

Dado os valores mínimos e ao comparar a mesma norma para os transformadores, têm-se o Quadro 39, o Quadro 40 e o Quadro 41.

Quadro 39 – Valores mínimos do fator Kul para os transformadores (UL 1561)

Fase	Transformador 2		Transformador 3		Transformador 4	
	Dia Hora	K_{UL}	Dia Hora	K_{UL}	Dia Hora	K_{UL}
R	26/03 13:45	1,05	16/03 14:31	1,04	03/03 14:19	1,07
S	26/03 13:45	1,05	16/03 14:51	1,08	04/03 17:19	1,11
T	24/03 13:55	1,04	16/03 14:51	1,04	04/03 16:39	1,06

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 40 – Valores máximos do fator K para os transformadores (EN 50541-2)

Fase	Transformador 2		Transformador 3		Transformador 4	
	Dia Hora	K	Dia Hora	K	Dia Hora	K
R	20/03 14:15	1,00	18/03 10:01	1,00	03/03 13:59	1,01
S	26/03 13:45	1,00	16/03 14:51	1,01	04/03 17:19	1,01
T	24/03 13:55	1,00	16/03 14:51	1,00	04/03 15:59	1,00

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 41 – Valores máximos do fator F_{HL} para os transformadores (C57.110)

Fase	Transformador 2		Transformador 3		Transformador 4	
	Dia Hora	F _{HL}	Dia Hora	F _{HL}	Dia Hora	F _{HL}
R	20/03 14:15	1,05	16/03 14:41	1,05	03/03 13:59	1,07
S	26/03 13:45	1,04	16/03 14:41	1,07	04/03 17:19	1,11
T	24/03 13:55	1,04	16/03 14:51	1,05	04/03 15:59	1,05

Fonte: Elaboração própria (2026).

O Quadro 42, Quadro 43 e Quadro 44 apresenta os valores de desclassificação associados aos fatores mínimos obtidos anteriormente, bem como o limite de potência, considerando a potência nominal de 166,67 kVA por fase.

Quadro 42 – Valores de DRK_{ul} para os transformadores (UL 1561)

Fase	Transformador 2			Transformador 3			Transformador 4		
	Dia Hora	DRK _{ul}	Limite (kVA)	Dia Hora	DRK _{ul}	Limite (kVA)	Dia Hora	DRK _{ul}	Limite (kVA)
R	26/03 13:45	0,99	165,00	16/03 14:31	1,00	166,67	03/03 14:19	0,99	165,00
S	26/03 13:45	1,00	166,67	16/03 14:51	0,99	165,00	04/03 17:19	0,99	165,00
T	24/03 13:55	1,00	166,67	16/03 14:51	1,00	166,67	04/03 16:39	0,99	165,00

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 43 – Valores de DRK para os transformadores (EN 50541-2)

Fase	Transformador 2			Transformador 3			Transformador 4		
	Dia Hora	DRK	Limite (kVA)	Dia Hora	DRK	Limite (kVA)	Dia Hora	DRK	Limite (kVA)
R	20/03 14:15	1,00	166,67	18/03 10:01	1,00	166,67	03/03 13:59	0,99	165,00
S	26/03 13:45	1,00	166,67	16/03 14:51	0,99	165,00	04/03 17:19	0,99	165,00
T	24/03 13:55	1,00	166,67	16/03 14:51	1,00	166,67	04/03 15:59	1,00	166,67

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 44 – Valores de DRFhl para os transformadores (C57.110)

Fase	Transformador 2			Transformador 3			Transformador 4		
	Dia Hora	DRFhl	Limite (kVA)	Dia Hora	DRFhl	Limite (kVA)	Dia Hora	DRFhl	Limite (kVA)
R	20/03 14:15	0,99	165,00	16/03 14:41	0,99	165,00	03/03 13:59	0,99	165,00
S	26/03 13:45	1,00	166,67	16/03 14:41	0,99	165,00	04/03 17:19	0,99	165,00
T	24/03 13:55	1,00	166,67	16/03 14:41	0,99	165,00	04/03 15:59	0,99	165,00

Fonte: Elaboração própria (2026).

O Quadro 36, Quadro 37 e Quadro 38 compara os valores obtidos acima com a potência aparente média solicitada pelas cargas medida no mesmo instante, a fim de verificar a ocorrência de ultrapassagem desses limites.

Quadro 45 – Valores limites de DRKul e medidos para os transformadores (UL 1561)

Fase	Transformador 2			Transformador 3			Transformador 4		
	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)
R	26/03 13:45	165,00	80,50	16/03 14:31	166,67	46,60	03/03 14:19	165,00	99,70
S	26/03 13:45	166,67	75,74	16/03 14:51	165,00	45,80	04/03 17:19	165,00	59,50
T	24/03 13:55	166,67	87,90	16/03 14:51	166,67	39,00	04/03 16:39	165,00	101,00

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 46 – Valores limites de DRK e medidos para os transformadores (EN 50541-2)

Fase	Transformador 2			Transformador 3			Transformador 4		
	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)
R	20/03 14:15	166,67	51,80	18/03 10:01	166,67	36,20	03/03 13:59	165,00	105,00
S	26/03 13:45	166,67	42,46	16/03 14:51	165,00	45,80	04/03 17:19	165,00	76,60
T	24/03 13:55	166,67	87,90	16/03 14:51	166,67	39,00	04/03 15:59	166,67	108,00

Fonte: Elaboração própria (2026).

Quadro 47 – Valores limites de DRFhl e medidos para os transformadores (C57.110)

Fase	Transformador 2			Transformador 3			Transformador 4		
	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)	Dia Hora	Limite (kVA)	Medido (kVA)
R	20/03 14:15	165,00	77,21	16/03 14:41	165,00	49,10	03/03 13:59	165,00	105,00
S	26/03 13:45	166,67	75,74	16/03 14:41	165,00	45,00	04/03 17:19	165,00	76,60
T	24/03 13:55	166,67	87,90	16/03 14:41	165,00	39,80	04/03 15:59	165,00	108,00

Fonte: Elaboração própria (2026).

Todos os transformadores apresentaram os valores de fator e desclassificação próximos aos unitários durante períodos de carga elevada, como dias úteis, nos quais a potência aparente média solicitada também permaneceu abaixo dos limites térmicos estabelecidos pelas normas.

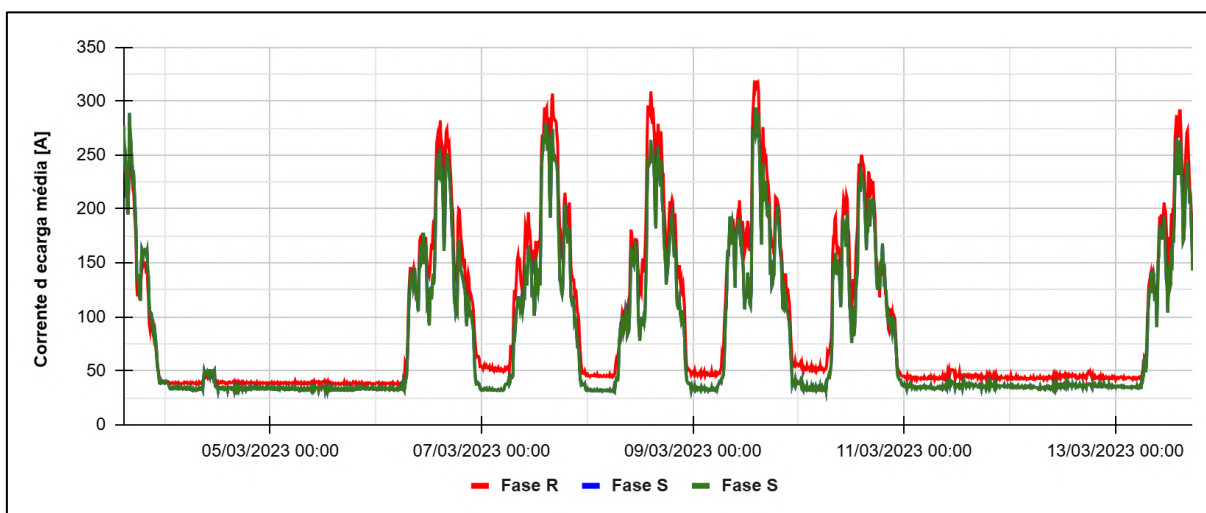
Sendo assim, determina-se que os transformadores se encontram adequadamente dimensionados em relação à desclassificação decorrente da presença de harmônicas de corrente na instalação elétrica. Verifica-se que essa instalação se enquadra na primeira classificação de fator K do Quadro 3, em que $K=1$ para períodos de carga elevada. Ressalta-se que, em caso aumento de carga na instalação, recomenda-se novas medições e a atualização dos cálculos, a fim de reavaliar os níveis de desclassificação dos transformadores. Além disso, para o acompanhamento dos transformadores, recomenda-se o monitoramento das

temperaturas máximas dos equipamentos periodicamente por meio de seus relés de proteção térmica, função 49 do *American National Standards Institute* (ANSI).

4.3 Comparação entre harmônicas de corrente nos anos de 2023 e 2026

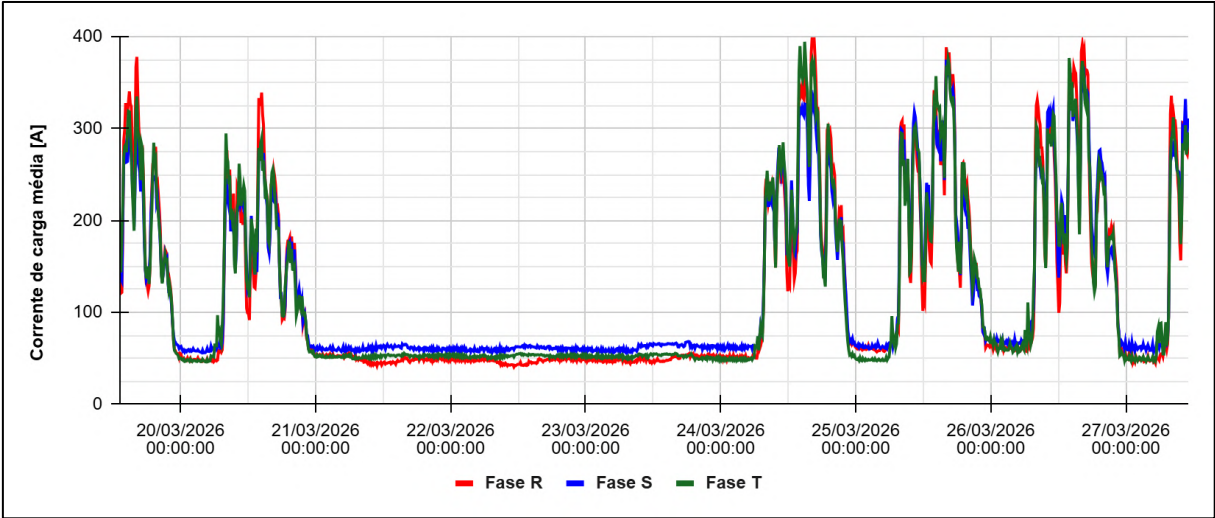
Na Figura 46 e na Figura 47 é possível observar as correntes de carga média do transformador 2 durante as análises realizadas em 2023, apresentadas no trabalho de Sanders (2025), e 2026, respectivamente, em períodos próximos do ano.

Figura 46 – Gráfico da corrente de carga média para o transformador 2 (2023)



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 47 – Gráfico da corrente de carga média para o transformador 2 (2026)



Fonte: Elaboração própria (2026).

O Quadro 48 apresenta os valores máximos e mínimos de corrente média de carga medidos em 2023 e 2026.

Quadro 48 – Valores máximos e mínimos de corrente de carga média para o transformador 2

Fase	2023				2026			
	Máximo		Mínimo		Máximo		Mínimo	
	Dia Hora	Valor (A)	Dia Hora	Valor (A)	Dia Hora	Valor (A)	Dia Hora	Valor (A)
R	09/03 14:18	319,00	05/03 18:28	37,10	24/03 16:05	399,50	22/03 11:05	40,55
S	09/03 14:18	294,00	05/03 12:58	30,90	25/03 15:55	374,90	20/03 03:55	55,95
T	03/03 15:58	324,00	05/03 11:18	21,90	24/03 14:45	394,40	20/03 04:25	46,09

Fonte: Elaboração própria (2026).

O percentil 95% do valor eficaz médio de cada harmônica ímpar de ordem 1 a 25 encontra-se no Quadro 49 para os anos de 2023 e 2026.

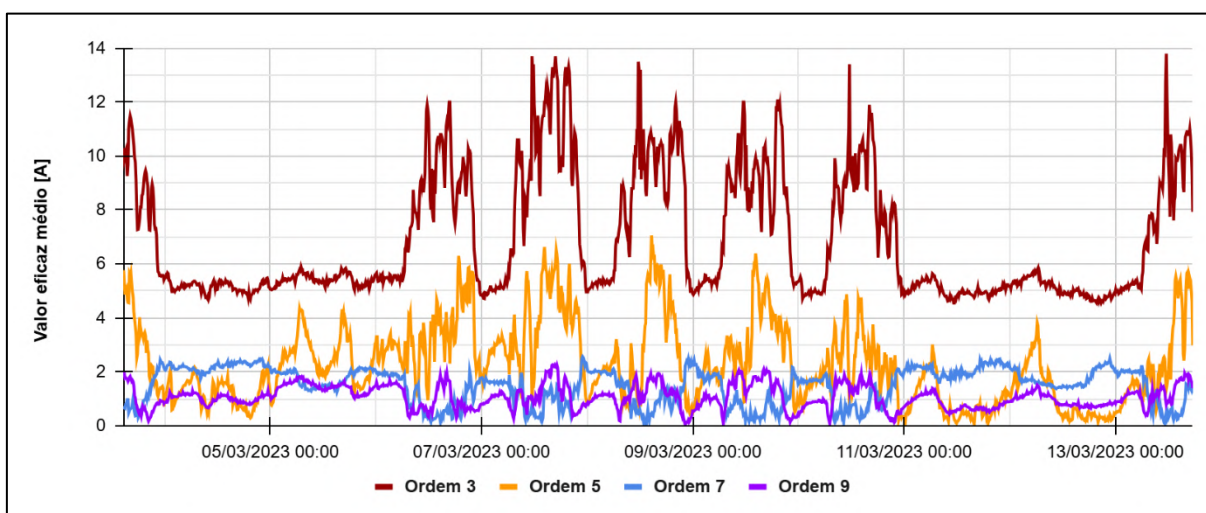
Quadro 49 – Percentil 95% do valor eficaz médio de cada harmônica ímpar para o transformador 2

Ordem	Fase R [A]		Fase S [A]		Fase T [A]	
	2023	2026	2023	2026	2023	2026
1	265,00	323,84	240,00	304,59	231,00	311,45
3	11,50	11,42	15,70	10,25	10,90	14,17
5	5,47	9,16	3,35	10,25	3,76	7,86
7	2,27	9,41	2,45	8,58	2,33	9,22
9	1,82	1,95	2,20	2,53	1,76	1,54
11	0,89	3,22	0,91	3,48	0,84	2,46
13	1,39	3,58	0,48	3,59	0,89	4,18
15	0,56	1,45	0,72	1,13	0,84	1,04
17	0,39	0,64	0,30	0,31	0,28	0,84
19	0,35	0,74	0,51	0,63	0,32	0,27
21	0,32	0,29	0,33	0,33	0,01	0,14
23	0,29	1,22	0,23	1,10	0,01	0,98
25	0,00	1,35	0,38	0,82	0,33	0,78

Fonte: Elaboração própria (2026).

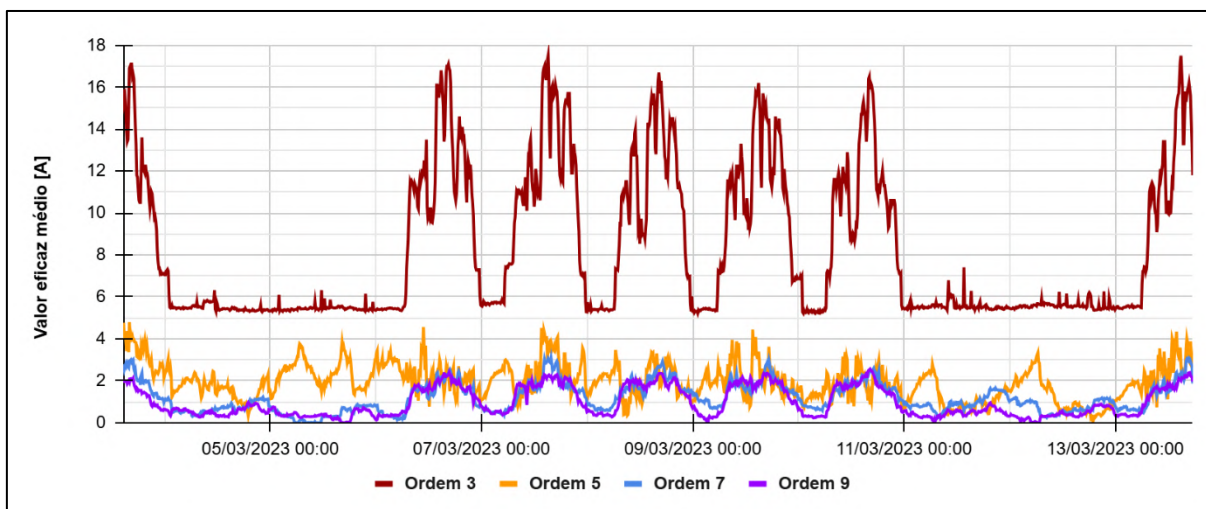
A Figura 48, a Figura 49 e a Figura 50 apresenta o valor eficaz médio das primeiras harmônicas ímpares para cada fase do transformador 2 ao longo da análise de 2023, sendo elas de 3, 5, 7 e 9ª ordem.

Figura 48 – Valores eficazes das harmônicas da fase R para o transformador 2 (2023)



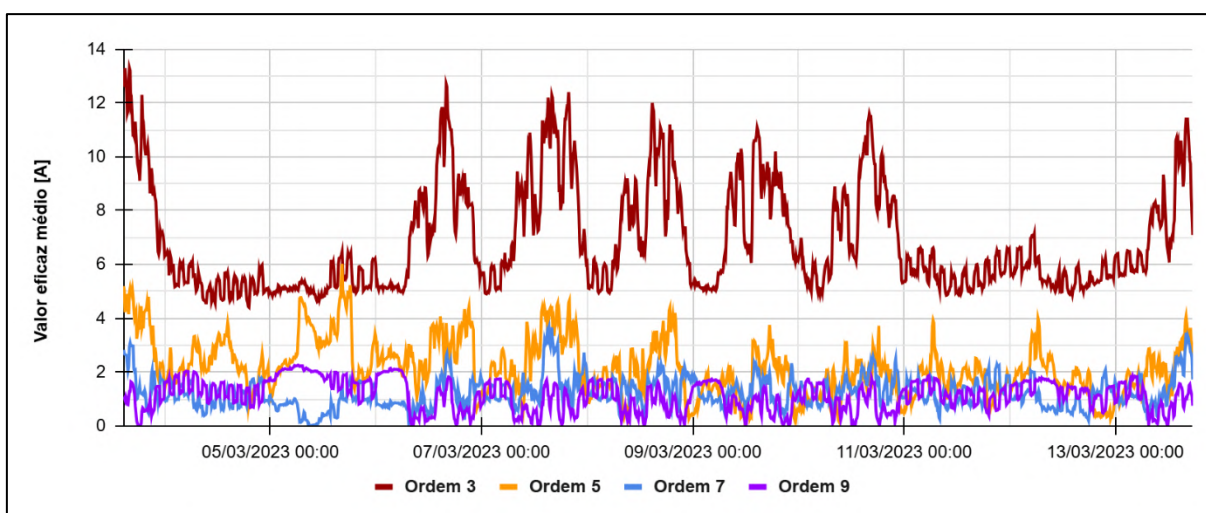
Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 49 – Valores eficazes das harmônicas da fase S para o transformador 2 (2023)



Fonte: Elaboração própria (2026).

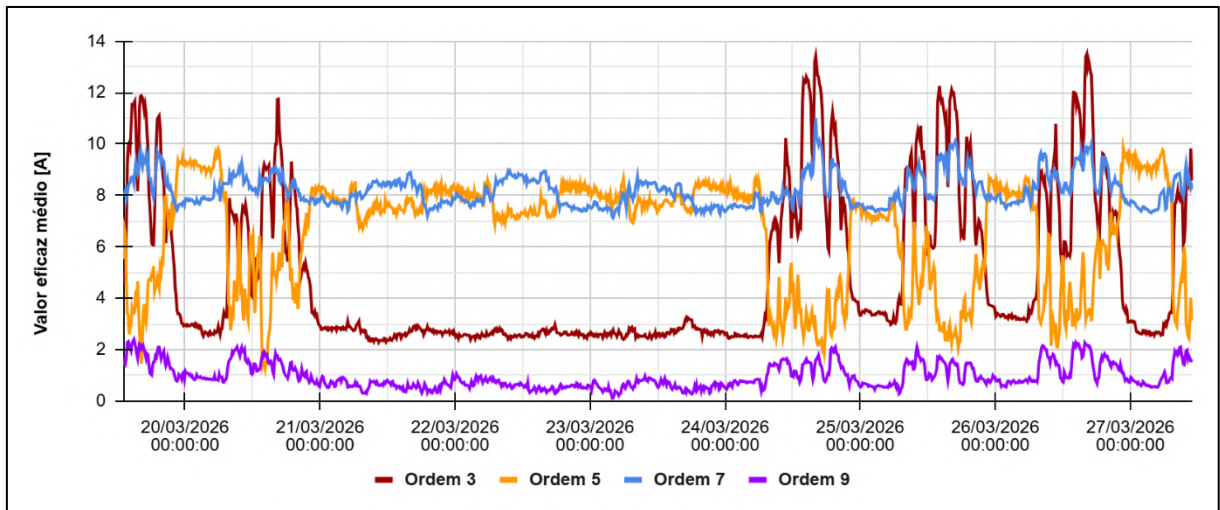
Figura 50 – Valores eficazes das harmônicas da fase T para o transformador 2 (2023)



Fonte: Elaboração própria (2026).

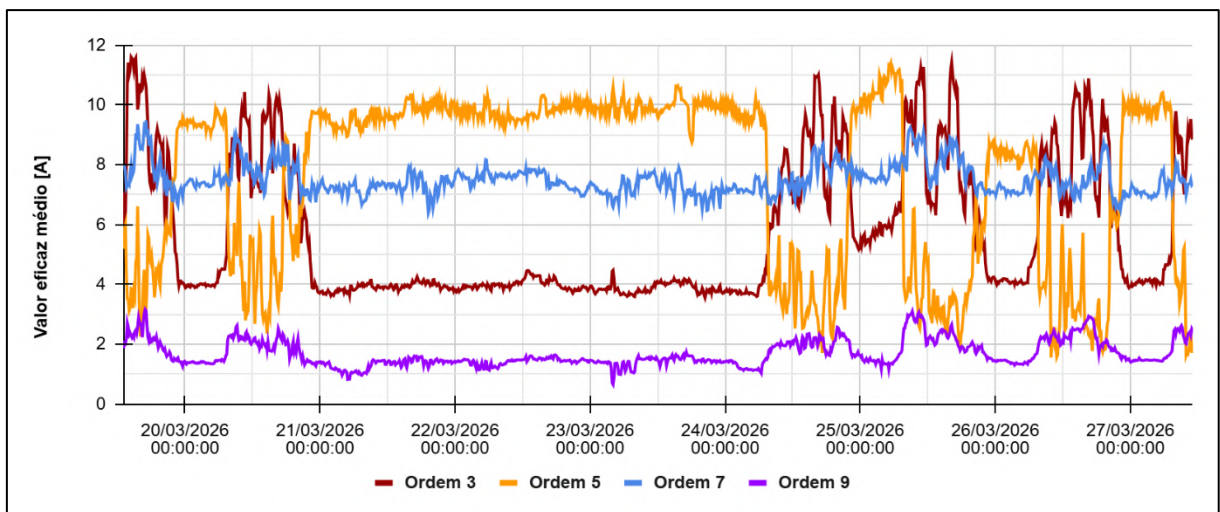
A Figura 51, a Figura 52 e a Figura 53, por sua vez, apresenta o valor eficaz médio das primeiras harmônicas ímpares para cada fase do transformador 2 ao longo da análise de 2026, sendo elas de 3, 5, 7 e 9ª ordem.

Figura 51 – Valores eficazes das harmônicas da fase R para o transformador 2 (2026)



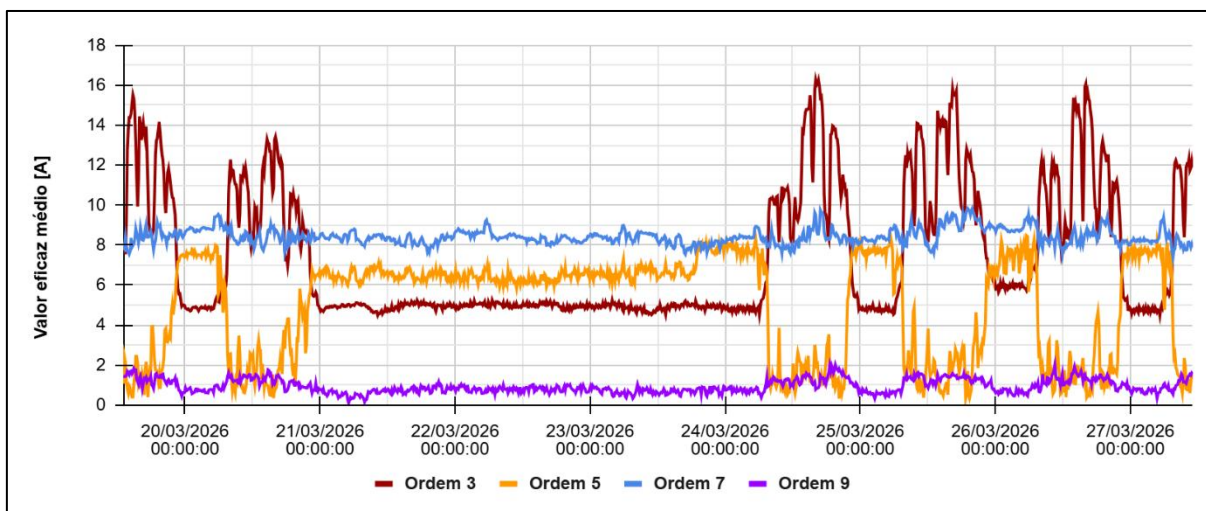
Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 52 – Valores eficazes das harmônicas da fase S para o transformador 2 (2026)



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 53 – Valores eficazes das harmônicas da fase T para o transformador 2 (2026)

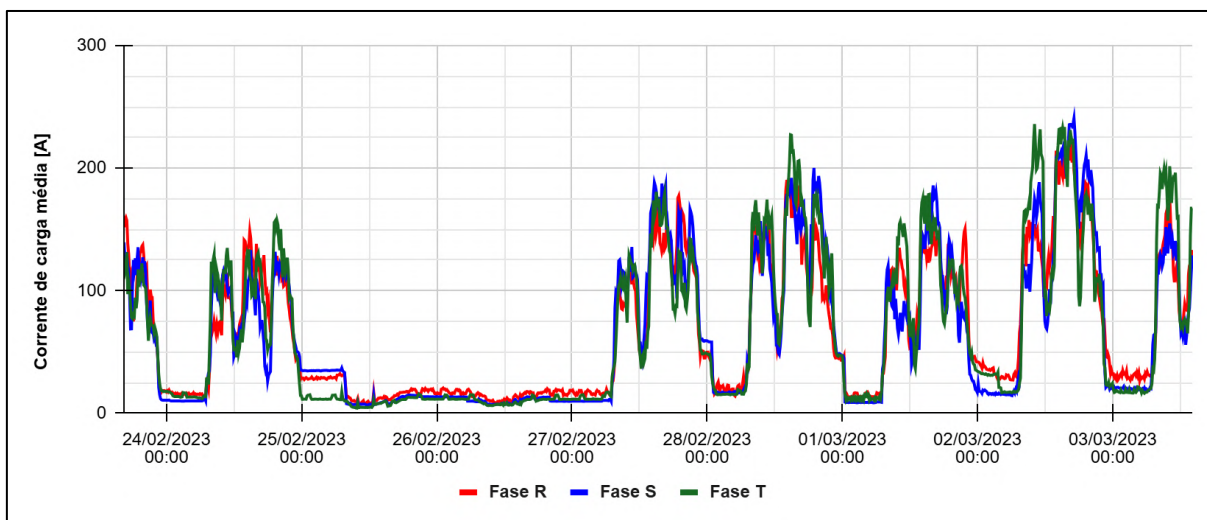


Fonte: Elaboração própria (2026).

As correntes de carga média medidas durante o ano de 2026 foram superiores às verificadas em 2023, conforme Figura 46, Figura 47 e Quadro 48. No entanto, apenas as componentes fundamentais apresentaram aumento expressivo, como pode ser visto no Quadro 49. Em ambos os anos, a componente de terceira ordem mostrou-se mais representativa em momentos de carga alta, segundo Figura 48, Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52 e Figura 53. Além disso, a partir dessas figuras, observa-se aumento dos valores eficazes das harmônicas de quinta ordem, durante os períodos de baixa carga, e harmônicas de sétima ordem, durante toda a análise.

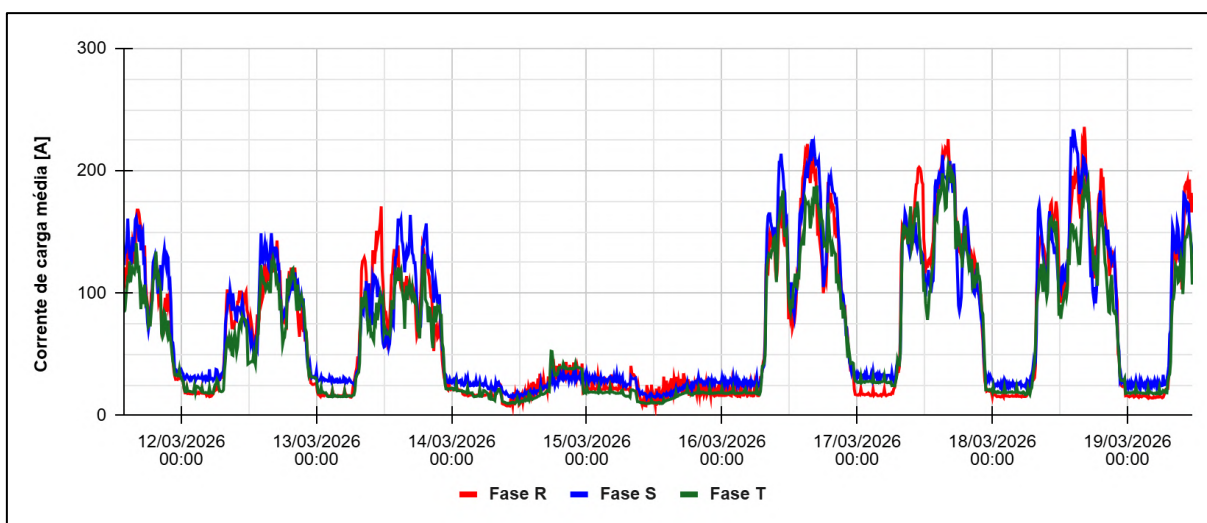
Na Figura 54 e na Figura 55 é possível observar as correntes de carga média do transformador 3 durante as análises realizadas em 2023 e 2026, respectivamente, em períodos próximos do ano.

Figura 54 – Gráfico da corrente de carga média para o transformador 3 (2023)



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 55 – Gráfico da corrente de carga média para o transformador 3 (2026)



Fonte: Elaboração própria (2026).

O Quadro 50 apresenta os valores máximos e mínimos de corrente média de carga medidos em 2023 e 2026.

Quadro 50 – Valores máximos e mínimos de corrente de carga média para o transformador 3

Fase	2023				2026			
	Máximo		Mínimo		Máximo		Mínimo	
	Dia Hora	Valor (A)	Dia Hora	Valor (A)	Dia Hora	Valor (A)	Dia Hora	Valor (A)
R	02/03 16:18	228,70	25/02 11:58	7,41	18/03 16:11	236,00	14/03 10:11	7,66
S	02/03 16:58	240,70	25/02 09:38	6,58	18/03 14:11	234,00	15/03 10:31	14,20
T	02/03 09:58	236,00	25/02 09:38	4,21	17/03 16:01	204,00	14/03 11:51	9,64

Fonte: Elaboração própria (2026).

O percentil 95% do valor eficaz médio de cada harmônica ímpar de ordem 1 a 25 encontra-se no Quadro 51 para os anos de 2023 e 2026.

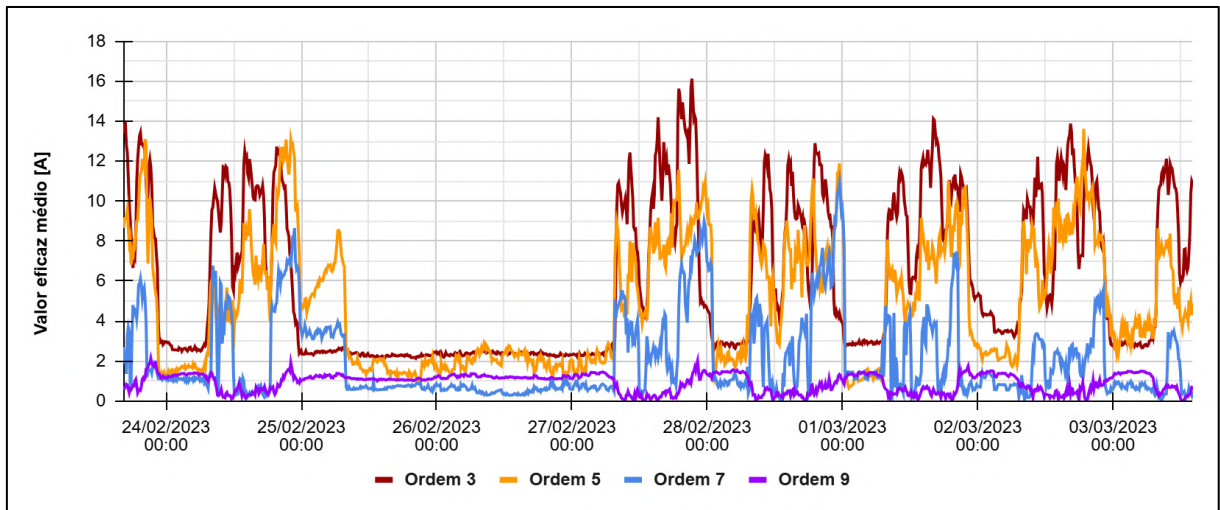
Quadro 51 – Percentil 95% do valor eficaz médio de cada harmônica ímpar para o transformador 3

Ordem	Fase R [A]		Fase S [A]		Fase T [A]	
	2023	2026	2023	2026	2023	2026
1	159,53	188,00	178,83	190,00	187,40	161,00
3	12,41	12,70	7,71	13,30	12,33	10,10
5	10,23	5,07	6,74	6,02	9,29	4,86
7	6,66	3,34	4,82	5,14	2,00	4,16
9	1,47	1,85	1,07	3,85	1,49	2,21
11	1,07	0,64	0,94	1,96	0,82	0,57
13	2,10	0,96	1,49	1,90	0,79	0,95
15	0,84	0,60	0,93	1,67	0,58	0,52
17	0,69	0,24	0,85	0,98	0,40	0,58
19	0,32	0,58	0,29	0,82	0,29	0,53
21	0,37	0,26	0,22	0,51	0,21	0,30
23	0,27	0,15	0,06	0,29	0,27	0,28
25	0,00	0,52	0,17	0,24	0,29	0,32

Fonte: Elaboração própria (2026).

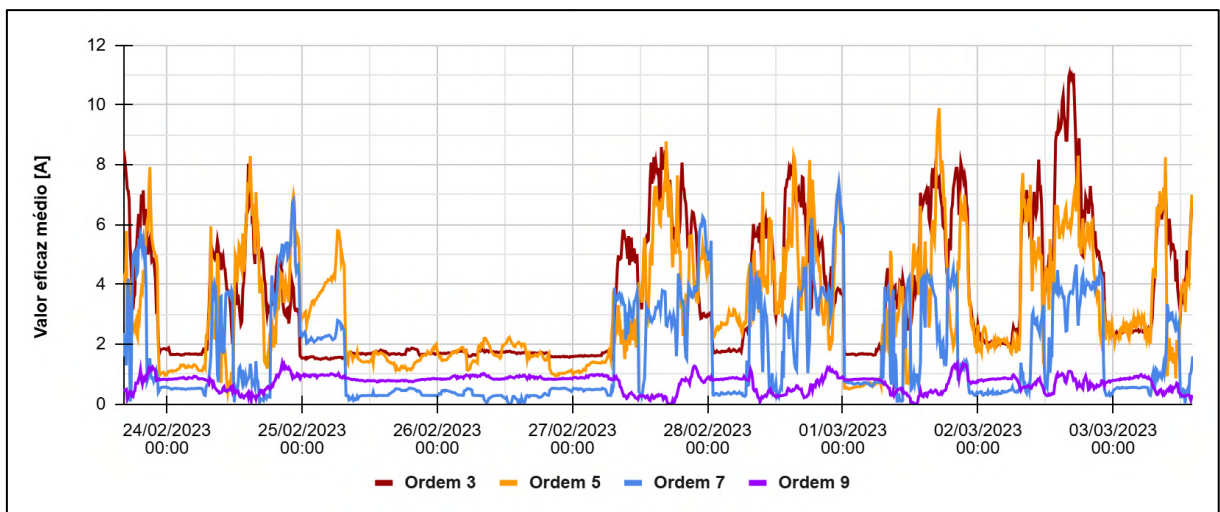
A Figura 56, a Figura 57 e a Figura 58 apresenta o valor eficaz médio das primeiras harmônicas ímpares para cada fase do transformador 3 ao longo da análise de 2023, sendo elas de 3, 5, 7 e 9ª ordem.

Figura 56 – Valores eficazes das harmônicas da fase R para o transformador 3 (2023)



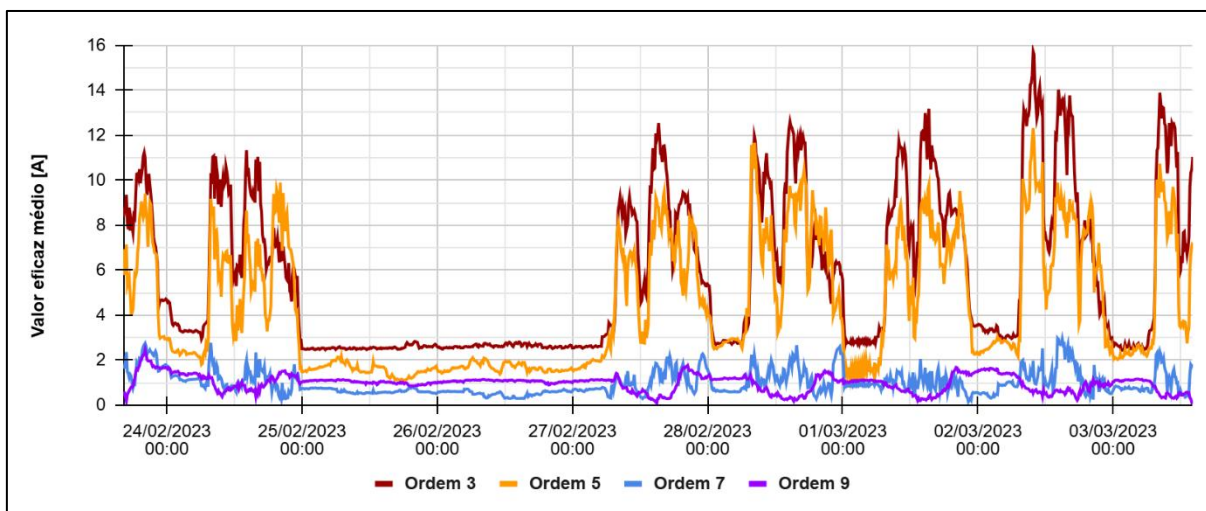
Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 57 – Valores eficazes das harmônicas da fase S para o transformador 3 (2023)



Fonte: Elaboração própria (2026).

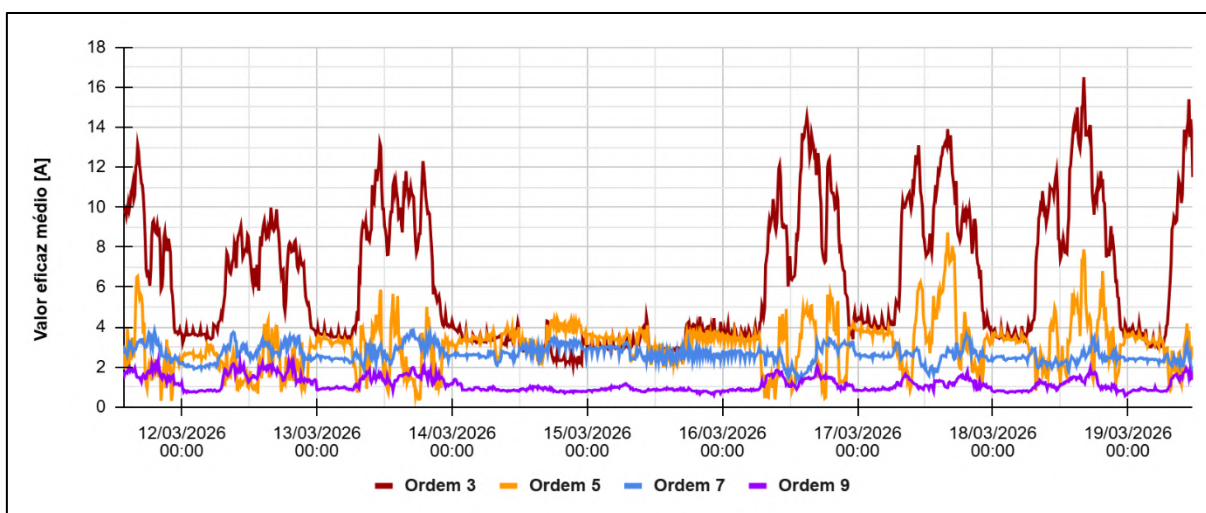
Figura 58 – Valores eficazes das harmônicas da fase T para o transformador 3 (2023)



Fonte: Elaboração própria (2026).

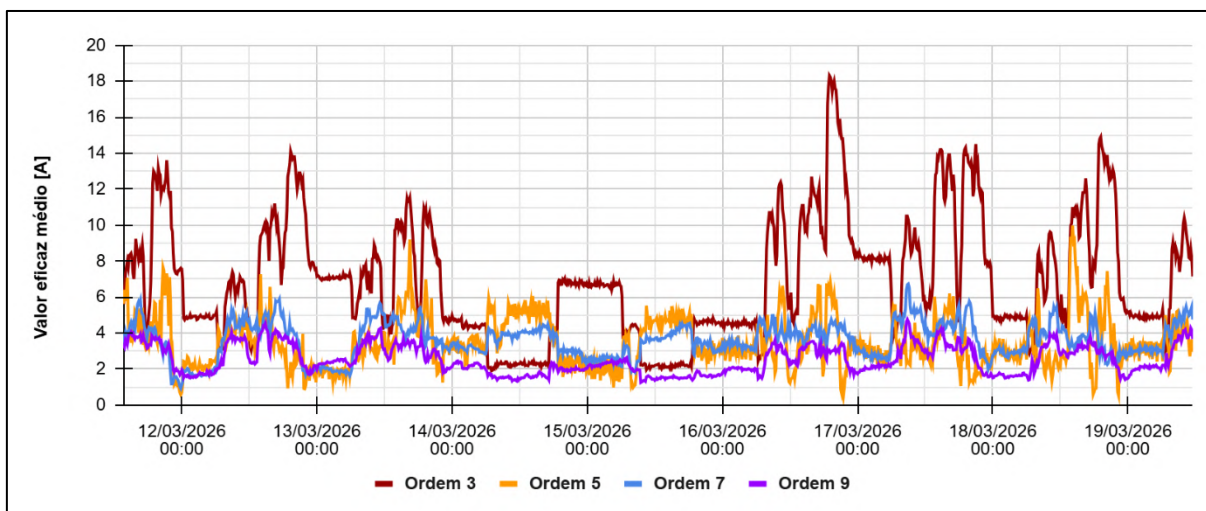
A Figura 59, a Figura 60 e a Figura 61, por sua vez, apresenta o valor eficaz médio das primeiras harmônicas ímpares para cada fase do transformador 3 ao longo da análise de 2026, sendo elas de 3, 5, 7 e 9ª ordem.

Figura 59 – Valores eficazes das harmônicas da fase R para o transformador 3 (2026)



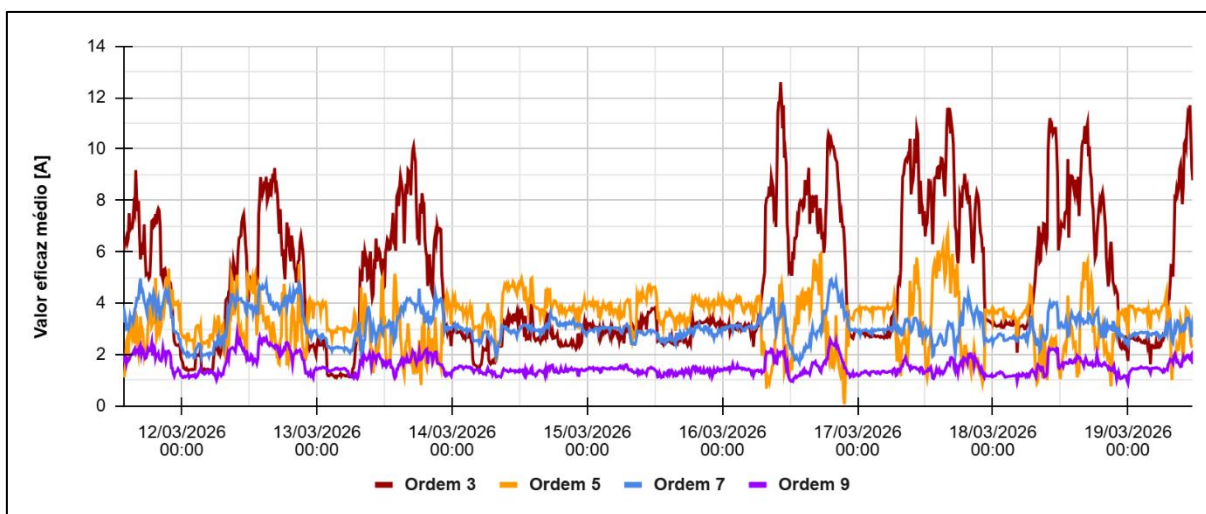
Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 60 – Valores eficazes das harmônicas da fase S para o transformador 3 (2026)



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 61 – Valores eficazes das harmônicas da fase T para o transformador 3 (2026)



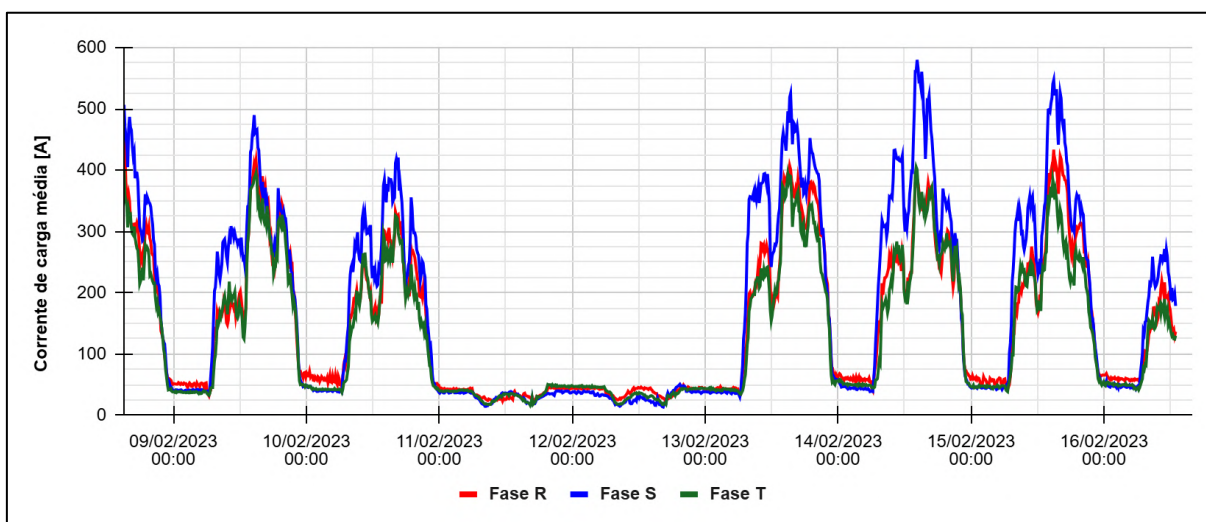
Fonte: Elaboração própria (2026).

As correntes de carga média medidas durante os anos de 2023 e 2026 foram próximas, conforme Figura 54, Figura 55 e Quadro 50. A fase R apresentou diminuição nos valores eficazes das componentes de quinta e sétima ordem no ano de 2026, enquanto a nona permaneceu próxima, como pode ser visto na Figura 56, na Figura 59 e no Quadro 51. Por sua vez, a fase S apresentou aumento nas componentes de terceira, sétima e nona ordem no ano de 2026, de acordo com a Figura 57 e a Figura 60. Já para a fase T, observa-se que as componentes de terceira

e quinta ordem diminuíram e sétima e nona ordem apresentaram aumento, segundo Figura 58, Figura 61 e Quadro 51. Além disso, em ambos os anos, as componentes harmônicas, principalmente de terceira ordem, mostraram-se mais representativas em momentos de carga elevada.

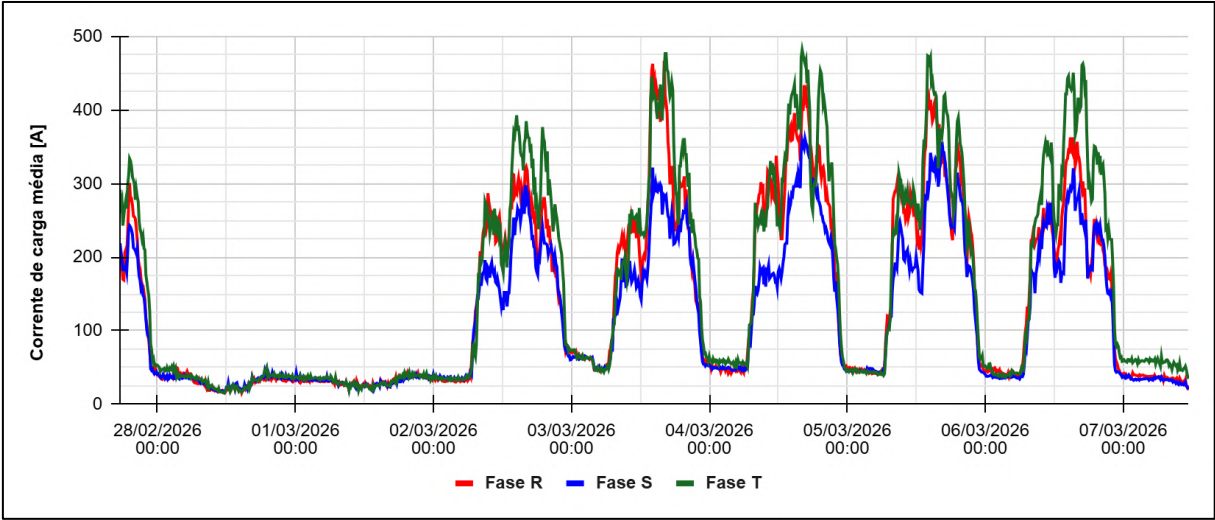
Na Figura 62 e na Figura 63 é possível observar as correntes de carga média do transformador 4 durante as análises realizadas em 2023 e 2026, respectivamente, em períodos próximos do ano.

Figura 62 – Gráfico da corrente de carga média para o transformador 4 (2023)



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 63 – Gráfico da corrente de carga média para o transformador 4 (2026)



Fonte: Elaboração própria (2026).

O Quadro 52 apresenta os valores máximos e mínimos de corrente média de carga medidos em 2023 e 2026.

Quadro 52 – Valores máximos e mínimos de corrente de carga média para o transformador 4

Fase	2023				2026			
	Máximo		Mínimo		Máximo		Mínimo	
	Dia Hora	Valor (A)	Dia Hora	Valor (A)	Dia Hora	Valor (A)	Dia Hora	Valor (A)
R	08/02 14:56	455,20	11/02 11:16	23,25	03/03 15:59	467,00	28/02 11:29	15,30
S	14/02 14:06	580,10	12/02 16:16	13,33	04/03 16:29	361,00	28/02 10:49	17,20
T	14/02 13:56	405,10	11/02 16:16	16,28	04/03 15:59	482,00	28/02 11:29	15,20

Fonte: Elaboração própria (2026).

O percentil 95% do valor eficaz médio de cada harmônica ímpar de ordem 1 a 25 encontra-se no Quadro 53 para os anos de 2023 e 2026.

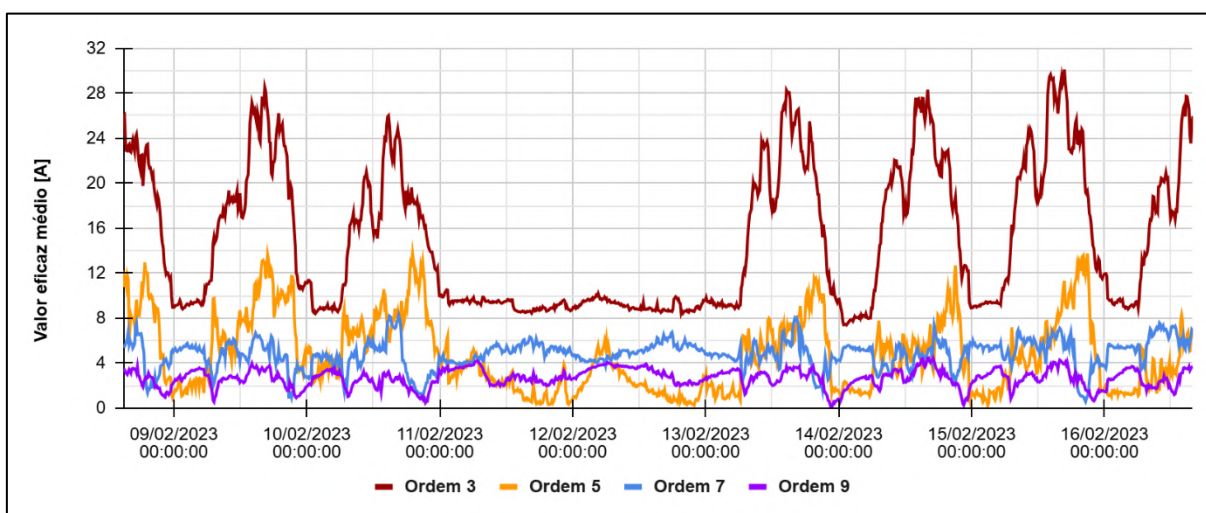
Quadro 53 – Percentil 95% do valor eficaz médio de cada harmônica ímpar para o transformador 4

Ordem	Fase R [A]		Fase S [A]		Fase T [A]	
	2023	2026	2023	2026	2023	2026
1	368,51	357,00	456,09	293,00	340,20	418,40
3	26,47	21,50	23,77	21,80	18,34	20,50
5	11,29	11,00	9,77	10,90	8,53	13,60
7	6,77	8,37	5,59	9,69	5,64	8,51
9	3,82	5,07	3,15	6,82	2,78	5,18
11	2,60	2,15	1,69	2,81	1,76	2,50
13	2,33	3,72	1,29	3,44	2,83	2,43
15	1,31	3,07	1,01	3,54	2,43	2,56
17	1,04	19,7	0,93	1,61	0,79	1,70
19	0,59	1,51	0,52	1,92	1,06	1,12
21	0,27	1,23	0,17	0,49	0,18	0,31
23	0,27	0,31	0,28	0,50	0,00	0,30
25	0,00	0,25	0,00	0,22	0,00	0,26

Fonte: Elaboração própria (2026).

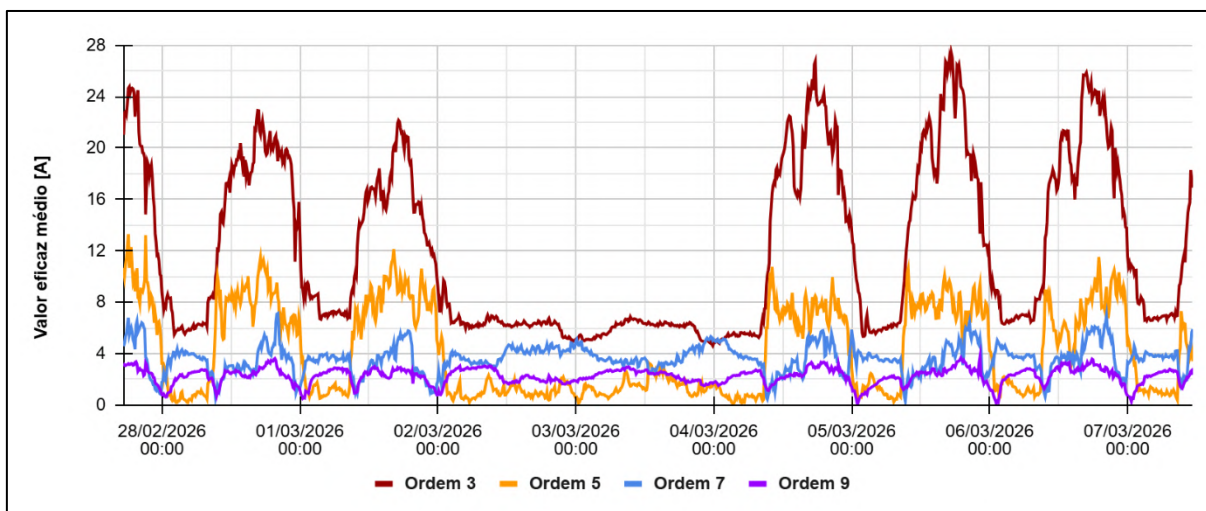
A Figura 64, a Figura 65 e a Figura 66 apresenta o valor eficaz médio das primeiras harmônicas ímpares para cada fase do transformador 4 ao longo da análise de 2023, sendo elas de 3, 5, 7 e 9ª ordem.

Figura 64 – Valores eficazes das harmônicas da fase R para o transformador 4 (2023)



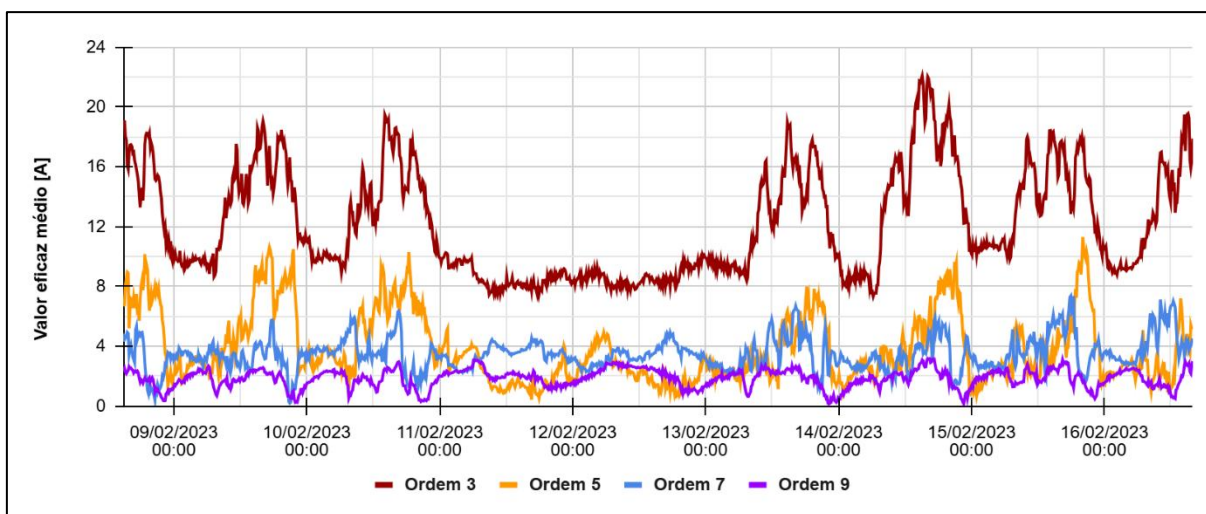
Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 65 – Valores eficazes das harmônicas da fase S para o transformador 4 (2023)



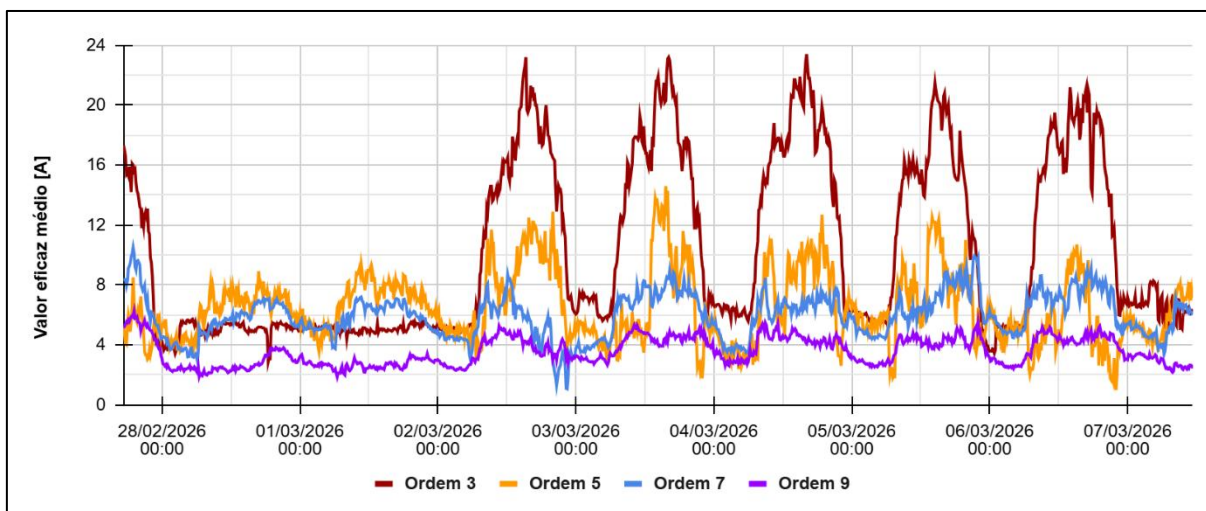
Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 66 – Valores eficazes das harmônicas da fase T para o transformador 4 (2023)

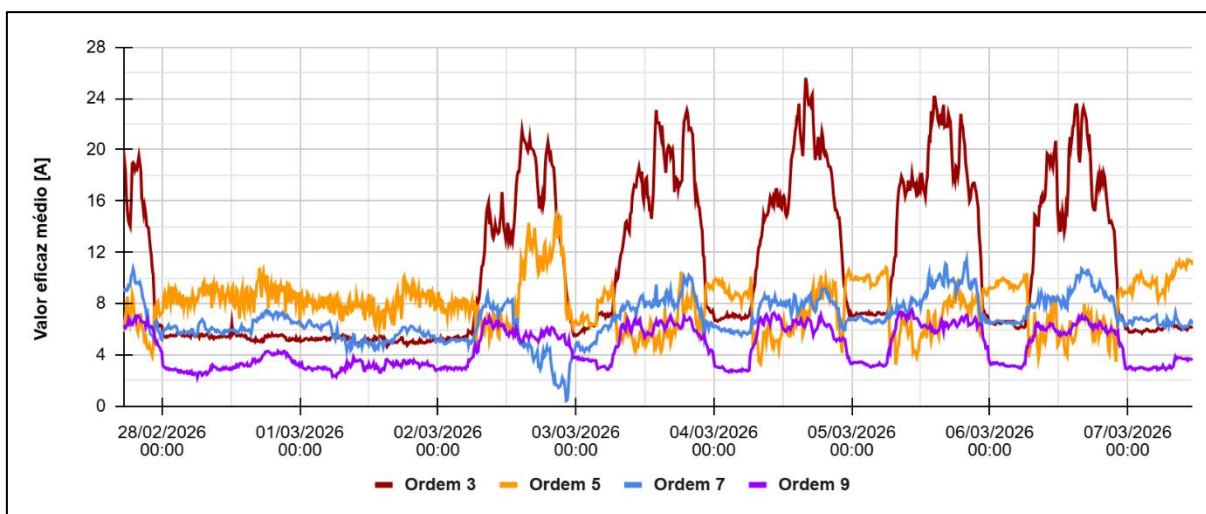


Fonte: Elaboração própria (2026).

A Figura 67, a Figura 68 e a Figura 69, por sua vez, apresenta o valor eficaz médio das primeiras harmônicas ímpares para cada fase do transformador 4 ao longo da análise de 2026, sendo elas de 3, 5, 7 e 9ª ordem.

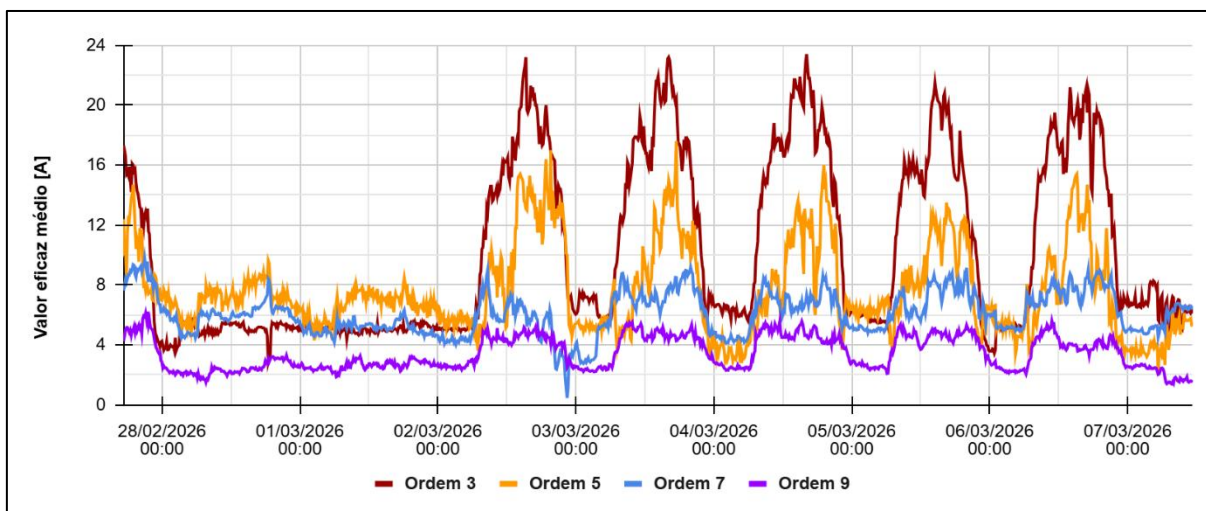
Figura 67 – Valores eficazes das harmônicas da fase R para o transformador 4 (2026)

Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 68 – Valores eficazes das harmônicas da fase S para o transformador 4 (2026)

Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 69 – Valores eficazes das harmônicas da fase T para o transformador 4 (2026)



Fonte: Elaboração própria (2026).

As correntes de carga média medidas durante o ano de 2026 foram superiores para as fases R e T e inferior para a fase S em comparação com as verificadas em 2023, conforme Figura 62, Figura 63 e Quadro 52. A fase R apresentou diminuição nos valores eficazes das componentes de terceira e quinta ordem no ano de 2026, enquanto a sétima e a nona aumentou, como pode ser visto na Figura 64, na Figura 67 e no Quadro 53. Por sua vez, a fase S e T apresentou aumento na maior parte das componentes harmônicas no ano de 2026, exceto para a terceira e décima terceira ordem, respectivamente, segundo Figura 65, Figura 66, Figura 68, Figura 69 e Quadro 53. Além disso, em ambos os anos, as componentes harmônicas, principalmente de terceira e quinta ordem, mostraram-se mais representativas em momentos de carga elevada.

Entretanto, mesmo com as variações apresentadas para os transformadores, os valores absolutos permaneceram próximos e bem abaixo da corrente média de carga medida. Dessa forma, é possível inferir que não tenham ocorrido variações significativas nos valores dos fatores e das desclassificações entre os anos, uma vez que verificou-se que não houve variação drástica das cargas alimentadas pelos transformadores.

5 CONCLUSÃO

Ao longo do trabalho, foram abordados diversos conceitos relevantes para a compreensão do estudo de caso e análise de seus resultados. Inicialmente, foram apresentadas as distorções harmônicas de corrente ocasionadas pelos dispositivos não lineares conectados à instalação elétrica, que deformam as formas de onda em relação à componente de frequência fundamental. Também foram discutidos seu cálculo por meio da série de Fourier, sua classificação em relação à sequência de fases e seus efeitos em equipamentos elétricos.

Em seguida, destacou-se aspectos teóricos acerca de transformadores, como materiais, classificação e demais aspectos construtivos para modelos denominados “de potência”. O fenômeno da indutância mútua e os modelos de transformador ideal e real foram estudados para identificar as perdas resultante da circulação de harmônicas. A tipologia de transformadores a seco foi explorada devido aos modelos do estudo de caso e o aquecimento elevado característico desses equipamentos.

Com os conceitos anteriormente estudados, foram apresentadas as normas e cálculos referentes ao fator K , uma forma de dimensionamento auxiliar que evidencia o efeito de componentes harmônicas nas perdas por correntes parasitas dos transformadores, delimitando o carregamento máximo possível para que não ocorra sobreaquecimento do transformador. Dessa forma, o presente trabalho consistiu em determinar se os equipamentos a seco do IFSC – Câmpus Florianópolis operam dentro do limite térmico estabelecido pelo fator K .

O estudo de caso iniciou-se pela caracterização da subestação e da sala dos quadros elétricos, bem como do aparelho e acessórios utilizados para realizar as análises de energia. Essas análises ocorreram entre fevereiro e março de 2026 e forneceram informações relevantes, posteriormente trabalhadas em planilhas eletrônicas. Calculou-se os valores dos fatores K_{UL} , K e F_{HL} e as desclassificações DRK_{UL} , DRK e DRF_{HL} durante o período das análises para os três transformadores, sobre os quais foram realizadas diversas comparações.

Verificou-se que a norma C57.110 da IEEE resultou em valores mais conservadores de desclassificação para a maior parte dos transformadores. Em

contrapartida, a EN 50541-2 apresentou os resultados menos conservadores para todos os equipamentos. Para dimensionamento, os fatores K_{UL} e F_{HL} mostram-se mais aplicáveis de forma prática, visto que os transformadores atuais são projetados para um fator K específico, não sendo necessária a obtenção das resistências elétricas equivalentes das perdas totais e das perdas medidas em corrente contínua. No estudo, foi possível observar ainda que as normas C57.110 e UL 1561 apresentam grande semelhança em suas metodologias de cálculo da desclassificação.

Os valores encontrados e a teoria estudada evidenciaram a predominância de sinais alternados na instalação, uma vez que as componentes de ordem ímpar foram mais significativas. Entre essas, as componentes harmônicas de sequência zero, em especial as de terceira ordem, apresentaram os valores mais elevados entre aquelas medidas, o que pode afetar o dimensionamento do barramento e do condutor de neutro. Além disso, de acordo com a UL 1561, o fator unitário é caracterizado por lâmpadas incandescentes, aquecedores à resistência, motores, controladores eletromagnéticos e geradores, possíveis cargas de maior predominância na instalação. Por fim, a revisão de literatura sobre transformadores auxiliou no cálculo da estimativa de perdas (e), extremamente importante para determinar a desclassificação dos transformadores, diante dos anexos referentes aos ensaios de perdas totais e de resistência ôhmica dos enrolamentos.

Dados os resultados, foi essencial comparar o nível de carga e a desclassificação calculada, uma vez que uma desclassificação alta não é relevante caso a potência solicitada seja baixa. Essa situação foi verificada no estudo de caso, em que os fatores aumentavam significativamente em momentos de carga baixa, entretanto, permaneciam próximos de um em horários de funcionamento da instituição, nos quais a carga é mais elevada. Assim, os transformadores não se encontraram termicamente subdimensionados em nenhum momento da análise de energia. Ressalta-se, ainda, a importância do acompanhamento das temperaturas máximas dos equipamentos por meio de seus relés de proteção térmica, bem como da instalação de novas cargas.

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se o acompanhamento do fator K dos transformadores periodicamente ou após a instalação de novas cargas, a fim de verificar possíveis mudanças na desclassificação térmica. Seria interessante,

ainda, analisar esse fator em outras épocas do ano e comparar os resultados com os valores encontrados durante o verão. Inspeções termográficas e o monitoramento das temperaturas máximas dos equipamentos poderiam, também, agregar informações aos estudos.

REFERÊNCIAS

- ABB INC. What is a transformer K-factor rating? **ABB Electrification U. S.**, Cary, 2025. Disponível em: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1TQC194900E0001&DocumentPartId>. Acesso em: 14 fev. 2026.
- ABNT. **NBR 5356-2**: Transformadores de potência. Parte 2: Aquecimento. Rio de Janeiro: 2007. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/26840/abnt-nbr5356-2-transformadores-de-potencia-parte-2-aquecimento>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- ABNT. **NBR 5356-11**: Transformadores de potência. Parte 11: Transformadores do tipo seco – Especificações. Rio de Janeiro: 2016. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/11640/abnt-nbr5356-11-transformadores-de-potencia-parte-11-transformadores-do-tipo-seco-especificacao>. Acesso em: 13 nov. 2025.
- AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000. 479 p.
- ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 874 p.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica**. Anexo VIII da Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021. Brasília, DF: ANEEL, 2021b. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf. Acesso em: 12 jul. 2026.
- ANEEL. **Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021**. PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Anexo VIII: Módulo 8: Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf. Acesso em: 21 out. 2025.
- APRYANSYAH, Muhammad; GARNIWA, Mk Iwa. Effect of K-Factor on Capability in Power Transformers. **Journal Of Physics: Conference Series**, [S.L.], v. 1962, n. 1, p. 012005, 1 jul. 2021. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1962/1/012005>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/353477229_Effect_of_K-Factor_on_Capability_in_Power_Transformers. Acesso em: 20 out. 2025.
- BARROS, Benjamin F.; GEDRA, Ricardo L. **Cabine Primária**: Subestações de Alta tensão de Consumidor. 3. ed. São Paulo: Érica, 2011. 192 p.
- CELESC. **Norma técnica N-321.0002**: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição. Florianópolis: 2016. Disponível em:

<https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/padrao-entrada/norma-N3210002.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2026.

CENELEC. **Norma técnica nº EN 50541:2013**: Three phase dry-type distribution transformers 50 Hz, from 100 kVA to 3 150 kVA, with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV. Bruxelas: 2013. Disponível em: <https://standards.globalspec.com/std/1612527/en-50541-2>. Acesso em: 21 out. 2025.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 698 p.

DECKMANN, Sigmar M.; POMILIO, José A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Campinas: [s. n.], 2016.

DUGAN, Roger C.; MCGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. W. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. [S. l.]: McGraw-Hill Professional, 2002. 528 p. ISBN 978-0071386227.

ELIAS FILHO, Robson Almeida. **Análise Técnico-Econômica de um Projeto de Transformador Trifásico a Seco Utilizando o Método dos Elementos Finitos e Algoritmos Genéticos**. 2024. Dissertação (Mestrado de Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2024. Disponível em: https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufri-pee_upl//THESIS/10004308/dissertao__robson_almeida_elias_filho_20240513164638589.pdf. Acesso em: 15 mar. 2026.

EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2026**.: MME/EPE, 2017. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/topico-70/Cap4_Texto.pdf. Acesso em: 09 out. 2025.

GOUDA, Osama E.; AMER, Ghada M.; SALEM, Waleed A. A. A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation. **ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research**, Patras, v. 1, n. 5, 2011. Disponível em: <https://etasr.com/index.php/ETASR/article/view/59/104>. Acesso em: 20 nov. 2025.

IEC. **Power transformers – Part 12**: Loading guide for dry-type power transformers. Genebra: 2018. Disponível em: https://webstore.ansi.org/standards/iec/iec60076powertransformers?ad_acct=3392&gad_source=1&gad_campaignid=23077309113&gbraid=0AAAAArA_aWbPxvB032BNticqLn6UhXOT7&gclid=Cj0KCQiA5uDiBhDAARIsAOxj0CFMXFEffbVhuJndM3J9tK-6HMDLsFCtDmvtq04D_JrRPuuDr1Ta158aAIFKEALw_wcB. Acesso em: 15 nov. 2025.

IEEE. **Recomendação prática nº C57.110:2018**: IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents. Nova Iorque: 2018. Disponível em: <https://standards.ieee.org/ieee/C57.110/5948/>. Acesso em: 20 out. 2025.

IFSC. **Plano de desenvolvimento institucional (PDI) 2025-2029.**: MEC, 2025. Disponível em: https://www.ifsc.edu.br/documents/d/documentos-norteadores/pdi_2025-2029-diagramado-versao-07-10-2025-pdf. Acesso em: 09 out. 2025.

JORDÃO, Rubens G. **Transformadores**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2017. 197 p.

KASSICK, Enio V. **Harmônicas em sistemas elétricos de baixa tensão**. Florianópolis: [s. n.], 2016.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S.A. **Transformer Engineering: Design and Practice**. Mumbai: Marcel Dekker, 2004. ISBN 0-8247-5653-3. Disponível em: <https://dotorresg.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/12/4-transformer-engineering-design-and-practice-s-v-kulkarnis-a-khaparde2004.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2026.

MARTIGNONI, Alfonso. **Transformadores**. 9. ed. São Paulo: Globo, 2003. 307 p. ISBN 85-250-0223-2.

MONTECELLI, Alcir J.; GARCIA, Ariovaldo V.. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2011. 264 p.

MORENO, Hilton. **Harmônicas nas Instalações Elétricas: causas, efeitos e soluções**. São Paulo: International Copper Association Brazil, 2019. 44 p. Disponível em: https://leonardo-energy.org.br/wp-content/uploads/2019/03/E-book_Procobre_Harmonicas.pdf. Acesso em: 9 out. 2025.

RIES, Walter. **Transformadores: Fundamentos para o projeto e cálculo**. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 420 p. ISBN 978-85-7430-632-2.

SANDER, Larissa S. **ESTUDO COMPARATIVO NA UTILIZAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS PARA REDUÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO COM MEDIDAS REALIZADAS NO LADO DE BAIXA TENSÃO DA SUBESTAÇÃO DO IFSC CÂMPUS FLORIANÓPOLIS**. 2025. 144 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2025.

UL. **Norma de segurança nº 1561:2023: Dry-Typr General Purpose and Power Transformes**. Northbrook: 2023. Disponível em: <https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?UniqueKey=22480>. Acesso em: 20 out. 2025.

WEG. **Transformadores a Seco**. Jaraguá do Sul: [s.n.], 2023. Disponível em: https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h46/h7d/50038545_portuguese_Traformador_Seco_web.pdf. Acesso em: 23 mar. 2026.

WEG. **Transformadores a Seco: Manual de Instalação, Operação e Manutenção**. Jaraguá do Sul: [s.n.], 2023. Disponível em: https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/h6d/manual_transformador_seco_10000647758_portugues.pdf. Acesso em: 23 mar. 2026.

YOKOGAWA. **CW500 Power Quality Analyzer Getting Started Guide: User's Manual**. 7. ed. [S. l.: s. n.], 2021.

ANEXOS



JUND-TRAFO

JUND-TRAFO TRANSFORMADORES

RELATÓRIO DE DESCARGAS PARCIAIS

Cliente: INST. FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECN. DE SANTA

Tipo: TRANSFORMADOR TRIFÁSICO MOLDE EPÓXI

Tensão: 13800 / 13200 / 12600 / 12000 / 11400V D - 380V yn

NS : 20490/1

Qtd: 1

Freq: 120 Hz

Potência: 500 kVA

Norma de Ensaio: ABNT 5356-11/2016

Fase Ensaada / TAP
Medição
Descarga Ambiente
Tensão de Excitação
Tensão de Ensaio

H 1	13800 V
(kV)	(pC)
	0,639
0,684	
0,494	6,95

H 2	13800 V
(kV)	(pC)
	0,639
0,684	
0,494	6,98

H 3	13800 V
(kV)	(pC)
	0,639
0,684	
0,494	6,92

Resultado Final:

H 1 < 6,95 pC

H 2 < 6,98 pC

H 3 < 6,92 pC

Observações / Comentários:

Instrumento utilizado

Medidor de Descargas Parciais PRESCO PD-4

Ensaio Realizado em: 28 / 10 / 2024



JUND-TRAFO TRANSFORMADORES

CERTIFICADO DE ENSAIO

Cliente: INST. FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECN. DE SANTA Modelos: TRANSFORMADOR TRIFÁSICO MOLDE EPÓXI

NP-TRA500.15.00-S-380	NS -	20490/1	Normas Aplicadas: ABNT 5356 / 1 / 2 / 3 / 4 / 5 - 07 / 5356 / 11-16			
Pot: kVA	500	Nº Fases	3	Frequência: 60 [Hz]	Refrigeração: AN	Desloc. Angular/Polaridade: Dyn1
Classe de Isol. / NBI At [kV]:		15 / 95	Classe de Isol. / NBI Bt [kV]:		1,1 / -	Classe de temperatura At / Bt: F/100°C
At	13800	13200	12600	12000	11400	D [V]
At	20,92	21,87	22,91	24,06	25,32	[A]
Bt	380	yn				[V]
Bt	759,67					[A]

ENSAIO DE RELAÇÃO DE TENSÃO

Tap [V]	13800	13200	12600	12000	11400					
Fase 1	63,201	60,464	57,711	54,958	52,206					
Fase 2	63,202	60,446	57,695	54,938	52,189					
Fase 3	63,204	60,467	57,714	54,961	52,207					
Erro	0,48%	0,49%	0,48%	0,47%	0,46%					

ENSAIOS DIELÉTRICOS

Resistência do Isolamento: At / Bt: 550000 [MOHMS] At/Massa: 450000 [MOHMS] Bt/Massa: 45000 [MOHMS]

Tensão Induzida: Tensão: 760 [V] Frequência: 120 [Hz] Tempo: 60 [Seg.]

Tensão Aplicada: Tempo: 60 [Seg.] At / Bt: 34,0 [kV] At / Massa: 34,0 [kV] Bt / Massa: 3,0 [kV]

ENSAIO EM VAZIO

Tensão	Im	RTC	Iom	IO%	Perdas em Vazio
380 [V]	0,452 [A]	25 [A]	11,30 [A]	1,49 [%]	1768 [W]

ENSAIO DE RESISTÊNCIA ÔHMICA

Temperatura Ambiente

28°C

Média

At	H1-H2	4,7214	OHMS	H1-H3	4,7203	OHMS	H2-H3	4,7213	OHMS	4,7210	OHMS
Bt	X1-X2	0,00216	OHMS	X1-X3	0,00224	OHMS	X2-X3	0,00214	OHMS	0,0021800	OHMS

ENSAIO DE CURTO CIRCUITO

Alimentação	Icc	Perdas Totais	Reatância	Resistência	Impedância
13800 [V]	20,92 [A]	8912,0 [W]	5,29 [%]	1,43 [%]	5,48 [%]

Observações:

Data	Responsável pelo Ensaio	Responsável pelo Laboratório	Inspetor
28/10/24	Matheus Mendes	Matheus Mendes	

APÊNDICE A3. TRANSFORMADOR 2

Dados do Transformador

Marca	Comtrafo
Número de Série	-
Potência [kVA]	500
Tensão Nominal MT [kV]	-
Tensão Nominal BT [V]	380/220
Ligação	Δ/Y
Óleo [litros]	seco
Peso [kg]	-
Impedância [%]	-
Ano de Fabricação	-
Temperatura de Ensaio [°C]	48,7
Temperatura de Correção [°C]	120

Medição da Relação de Transformação

Fase	Valor lido	Valor nominal	Diferença [%]
A	60,235	60	0,39
B	60,198	60	0,33
C	60,178	60	0,3
Posição	-		
Tensão [kV]	13,2		

Medição da Resistência Ôhmica dos Enrolamentos

Terminais	Valor Lido	Valor Corrigido
X0/X1 [mΩ]	1,323	2,147
X0/X2 [mΩ]	1,343	2,179
X0/X3 [mΩ]	1,352	2,194
H1/H3 [Ω]	3,411	5,535
H1/H2 [Ω]	3,432	5,569
H2/H3 [Ω]	3,412	5,537

APÊNDICE A4. TRANSFORMADOR 3

Dados do Transformador

Marca	Onix
Número de Série	74.670
Potência [kVA]	500
Tensão Nominal MT [kV]	13,8 a 11,4
Tensão Nominal BT [V]	380/220
Ligação	Δ/Y
Óleo [litros]	seco
Peso [kg]	1.400
Impedância [%]	7,3
Ano de Fabricação	2.010
Temperatura de Ensaio [°C]	55
Temperatura de Correção [°C]	120

Medição da Relação de Transformação

Fase	Valor lido	Valor nominal	Diferença [%]
A	60,183	60	0,31
B	60,193	60	0,32
C	60,175	60	0,29
Posição	2		
Tensão [kV]	13,2		

Medição da Resistência Ôhmica dos Enrolamentos

Terminais	Valor Lido	Valor Corrigido
X0/X1 [mΩ]	1,279	2,005
X0/X2 [mΩ]	1,320	2,069
X0/X3 [mΩ]	1,332	2,088
H1/H3 [Ω]	4,057	6,360
H1/H2 [Ω]	4,053	6,354
H2/H3 [Ω]	4,061	6,366

APÊNDICE A5. TRANSFORMADOR 4

Dados do Transformador

Marca	Jund-trafo
Número de Série	20490/1
Potência [kVA]	500
Tensão Nominal MT [kV]	13,8 a 11,4
Tensão Nominal BT [V]	380/220
Ligação	Δ/Y
Óleo [litros]	seco
Peso [kg]	1.420
Impedância [%]	5,48
Ano de Fabricação	2.024
Temperatura de Ensaio [°C]	45
Temperatura de Correção [°C]	120

Medição da Relação de Transformação

Fase	Valor lido	Valor nominal	Diferença [%]
A	60,439	60	0,73
B	60,438	60	0,73
C	60,434	60	0,72
Posição	2		
Tensão [kV]	13,2		

Medição da Resistência Ôhmica dos Enrolamentos

Terminais	Valor Lido	Valor Corrigido
X0/X1 [mΩ]	1,218	2,016
X0/X2 [mΩ]	1,288	2,132
X0/X3 [mΩ]	1,310	2,168
H1/H3 [Ω]	5,031	8,326
H1/H2 [Ω]	5,045	8,350
H2/H3 [Ω]	5,023	8,313