

# Método para adaptação do transformador de corrente com erro classe 10P, para o erro de classe 5P, com o mesmo núcleo<sup>1</sup>

## *Method for adapting a current transformer with a class 10P error to a class 5P error with the same core*

Cristiane Greice Magalhães Santos<sup>2</sup>  
Elton Gimenez Rossini<sup>3</sup>  
José de Souza<sup>4</sup>

### Resumo

O objetivo deste estudo é avaliar a eficácia de um método desenvolvido, para reutilizar os núcleos de silício de TCs de proteção que normalmente são descartados, devido a erros de dimensionamento. Isso é realizado por meio de testes em bancada em um ambiente de laboratório industrial. Para atingir esse objetivo, um protótipo de transformador de corrente foi concebido, de modo a estar em conformidade com as normas regulatórias. Esse protótipo também foi capaz de reduzir a margem de erro, diminuindo-a de 10% para 5%, ao mudar de uma exatidão de 50 VA 10P20, para atender a 50 VA 5P20. Utilizando um equipamento de análise de energia, foi possível identificar que os erros de relação e fase permaneceram em uma faixa entre -2.16% e 82.01%, respectivamente. Isso se deve à inclusão de um canal entre os núcleos do transformador. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, estando em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT/NBR 6856 e IEEE std C57.13-1993. Os resultados abrem possibilidades para a aplicação em diversas áreas que fabricam transformadores de corrente.

**Palavras-chave:** transformador de corrente; relação; erro.

### Abstract

*The aim of this study is to evaluate the effectiveness of a method developed to reuse the silicon cores of protection CTs that are normally discarded due to sizing errors. This is done by means of bench tests in an industrial laboratory environment. To achieve this, a prototype current transformer was designed that complies with regulatory standards. This prototype was also able to reduce the margin of error from 10% to 5% by switching from an accuracy of 50 VA 10P20 to 50 VA 5P20. Using energy analysis equipment, it was possible to identify that the ratio and phase errors remained in a range between -2.16% and 82.01% respectively. This is due to the inclusion of a channel between the transformer cores. The results obtained were considered satisfactory, conforming to the guidelines established by ABNT/NBR 6856 and IEEE std C57.13-1993. The results open up possibilities for application in various areas that manufacture current transformers.*

**Keywords:** current transformer; ratio; error.

<sup>1</sup> Este artigo é resumo do trabalho de conclusão de curso de Engenharia Energia apresentado na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), Porto Alegre, RS, Brasil, em 16/07/2021, sob orientação do Dr. Elton Gimenez Rossini.

<sup>2</sup> Bacharel em Engenharia de Energia pela UERGS. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8463-9209>. E-mail: [cmagalhaess12@gmail.com](mailto:cmagalhaess12@gmail.com)

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor da UERGS. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4195-2003>. E-mail: [elton-rossini@uergs.edu.br](mailto:elton-rossini@uergs.edu.br)

<sup>4</sup> Doutor em Processos de Fabricação pela UFRGS. Professor da Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha (FETLSVC), Novo Hamburgo, RS. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5888-840X>. E-mail: [josesouza@liberato.com.br](mailto:josesouza@liberato.com.br)

Artigo recebido em 22.08.2022 e aceito em 28.11.2022.



## 1 Introdução

A confiabilidade de equipamento de transmissão e distribuição de energia elétrica é garantida por meio de ensaios periódicos. Os ensaios de conformidade seguem procedimentos padronizados que permitem verificar a qualidade de tais equipamentos, garantindo a confiabilidade operacional do sistema de fornecimento de energia elétrica (Bandeira, 2004).

As concessionárias de energia utilizam transdutores eletromagnéticos de tensão e corrente, como sistema de proteção, medição e controle. Dessa forma, é possível adaptar os parâmetros das grandezas elétricas de relés de proteção e medidores de energia em níveis aceitáveis (Borges, 2014). Esses transdutores são conhecidos como transformadores de corrente e neles são aplicados testes para o conhecimento do seu funcionamento, basicamente ele deve reduzir a corrente a valores seguros para medição, isolando o circuito primário do secundário, validando, assim, os requisitos necessários da norma.

A reprovação de um transformador de corrente motivou o estudo específico do equipamento, para determinar quais os melhores métodos para deixar em conformidade com as normas NBR 6856 e IEEE Std C57.13-1993.

Com a coleta de dados e ensaios de laboratórios, é possível obter a não linearidade das curvas de saturação, o erro do fator de segurança, iniciando assim, um estudo dedicado ao ajuste de erro, para o transformador de corrente entrar nos parâmetros definidos, de acordo com as normas que tratam da especificação e ensaios. Os testes em transformadores de corrente são restritos e podem ser difíceis de encontrar. Assim, este estudo, direcionado ao erro da classe de exatidão, poderá ajudar e encaminhar o leitor ao entendimento e solução dos transformadores encontrados com o mesmo problema.

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de um método desenvolvido, para reaproveitar os núcleos de silício de TCs de proteção que são descartados, devido a erros de dimensionamento, a partir de testes de bancada em laboratório industrial, empregando o método de ensaios conforme as normas NBR 6856 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992b) e IEEE std C57.13-1993 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1994).

## 2 Fundamentação teórica

Os transformadores de corrente possuem o mesmo princípio de funcionamento dos transformadores

de potência, no entanto, são projetados de forma a transformar correntes de um alto valor para um valor mais baixo, podendo, assim, ser medido por relés e outros instrumentos e proporcionar segurança pessoal, durante a medição, além de facilitar a manutenção (Pires, 2018). De certa forma, eles são considerados simples, pois possuem dois enrolamentos: o primário e o secundário. Seu enrolamento primário é constituído de poucas espiras e ligado em série com o circuito de alta tensão, dessa maneira, a impedância do circuito é desprezível. Já, o enrolamento secundário é constituído por várias espiras com um fio relativamente fino, sua corrente nominal, transformada com valores entre 1 A ou 5 A, deve operar em curto-circuito, e esse é ligado aos instrumentos de medição (UMANS, 2014).

Os transformadores de corrente podem ser classificados para serviço de medição ou serviço de proteção, nesse caso, o sinal do secundário que irá diferenciar os casos. Neste trabalho, foi utilizado, como referência, o transformador de corrente para serviço de proteção.

Os TCs são classificados de acordo com a construção mecânica (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015) em diferentes tipos: enrolado (primário enrolado), barra, janela, bucha, com núcleo separável, com vários enrolamentos primários, com vários núcleos, de múltipla relação e pedestal. Os transformadores de corrente também são classificados como transformadores de instrumentos, cujo enrolamento secundário reproduz a corrente do enrolamento primário, com uma proporção definida, conhecida e adequada. Seu enrolamento secundário tem como aplicação a alimentação das bobinas de corrente de instrumentos elétricos de medição, controle e proteção. Já o enrolamento primário é ligado em série com a linha de alta tensão, cuja corrente deve ser medida e controlada, possuindo então impedância desprezível, quando comparada com o circuito externo (D'Ajuz, 1985). As principais aplicações desse tipo de transformador são:

- a) isolar os instrumentos de medição, controle e proteção das altas tensões dos circuitos de potência, assim, a construção deles torna-se mais prática e protege os técnicos;
- b) reduzir as altas tensões e correntes dos circuitos de potência, diminuindo custos da sua produção e facilitando a padronização dos instrumentos utilizados.

O circuito do enrolamento secundário fornece uma corrente proporcional à corrente que circula no primário, porém de valor reduzido, dessa forma, os

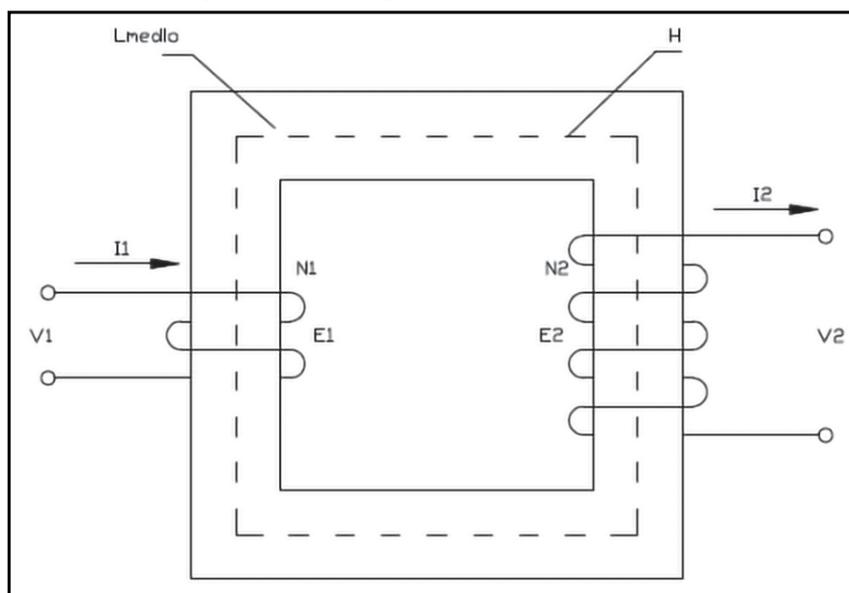
instrumentos conectados a ele podem ser fabricados de forma relativamente pequenos (Bandeira, 2004).

Os transformadores de corrente são instrumentos elétricos de baixa impedância, e seu funcionamento é baseado na Lei de Indução de Faraday.

$$e = - \frac{d\lambda}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Ao aplicar a Lei de Faraday, nos dois enrolamentos, primário e secundário, é estabelecida a relação entre as tensões, o número de espiras em cada enrolamento e o fluxo magnético. Os índices 1 e 2 representam, respectivamente, os enrolamentos primário e secundário, conforme figura 1 (Fitzgerald, 2003).

Figura 1 – Representação simplificada do transformador de corrente



Fonte: Borges (2014).

Os transformadores de corrente possuem padronização de suas características. As especificações para projeto, operação e realização de ensaios seguem regras determinadas em normas técnicas. No Brasil, existem três normas da ABNT relacionadas aos transformadores de corrente:

- NBR 6546/91: Transformadores para instrumentos: terminologia (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991);
- NBR 6856/92: Transformadores de corrente: especificação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992b);
- NBR 6821/92: Transformadores de corrente: método de ensaio (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992a).

Em nível mundial, dentre outras, têm-se as seguintes, frequentemente referenciadas na literatura:

- IEEE C57.13/1993 – IEEE Standard requirements for instruments transformers. (revisão da antiga ANSI/IEEE C57.13/1978) (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1994);
- IEC – 60044-1 – Instruments transformers – part 1:

current transformers (International Electrotechnical Commission, 2003) (NFC 42-502, na França);

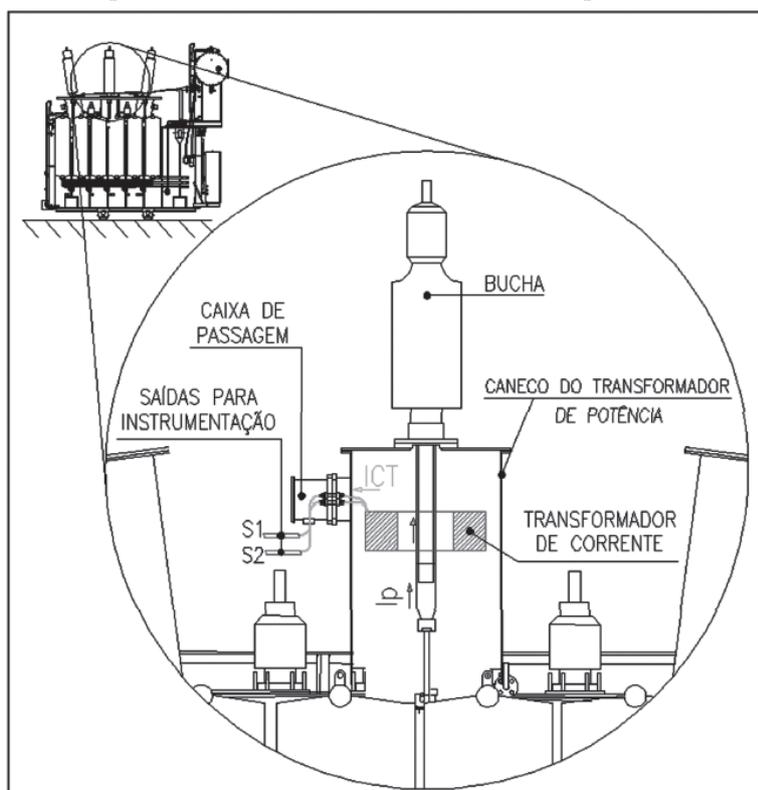
- IEC – 60044-6 – Instruments transformers: part 6: requirements for protective current transformers for transient performance (International Electrotechnical Commission, 1992).

Existem diferenças em algumas especificações entre as normas brasileiras e internacionais, principalmente no que se refere a limites de tensão e corrente em ensaios.

A definição para construção do transformador de corrente depende da disposição dos enrolamentos e do núcleo. Existem basicamente quatro tipos construtivos: enrolado (primário enrolado), barra, janela e bucha.

O escolhido para estudo é o tipo bucha ou com núcleo toroidal, pois é o mais utilizado para proteção de transformadores de força. É projetado para ser instalado sobre uma bucha de equipamento elétrico (transformadores, disjuntores etc.), fazendo parte integrante dele.

Figura 2 – Representação da localização e saídas do TC para instrumentação



Fonte: Schimitz (2016).

O papel principal da bucha é transmitir ou receber a tensão e corrente elétrica com a menor perda possível.

A corrente que circula na bucha de um transformador de potência é muito alta. Essa corrente, vista pelo transformador de corrente, é denominada de corrente primária ( $I_s$ ), pois circula também no enrolamento primário do TC. A corrente primária pode ultrapassar os 1 kA, sendo ela, uma importante fonte para monitoramento do funcionamento do transformador de potência (Schimitz, 2016).

Conforme a finalidade de aplicação, os transformadores de corrente podem ser para medição ou proteção. Esses transformadores são capazes de transformar elevadas correntes de sobrecarga ou de curto-circuito em pequenas correntes, propiciando a operação dos relés sem que eles estejam em ligação direta com o circuito primário da instalação, dessa maneira oferecendo maior segurança para o trabalho e facilitando a manutenção dos seus componentes (Vicente, 2014).

De acordo com a IEEE Std C57.13 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1994), eles são designados pela sua classificação e tensão secundária nominal:

- C e K: TC cujas perdas no núcleo não têm efeito significativo nas relações de transformação, respeitados os limites de utilização e cargas padrão;
- T: TC cujas perdas no núcleo têm efeito significativo nas relações de transformação, respeitados os limites de utilização e cargas padrão.

A tensão secundária nominal é a tensão terminal que o transformador de corrente entrega, sem exceder o erro de 10% na relação, quando por ele circula uma corrente igual a vinte (20) vezes a nominal e em seu secundário está ligada uma carga padrão. O erro de relação deve ser mantido nos limites para a carga padrão ou cargas de valores inferiores,

De acordo com a NBR 6856 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992b), são agrupados também, segundo a impedância do enrolamento secundário.

A classe P de exatidão é representada pela letra P, seguida do valor expresso em porcentagem, correspondente ao maior erro composto que se deseja especificar. Como exemplo: 50 VA 10P20 significa TC com uma carga secundária de 50 VA, atendendo uma classe de exatidão de 10%, fator-limite de exatidão 20 vezes a corrente nominal.

O erro composto é medido para um valor de

corrente correspondente à corrente nominal, multiplicada pelo fator-limite de exatidão especificado. As classes de exatidão P padronizadas, para TC, para proteção são definidas como 5P e 10P e seguem os limites de erro (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992b).

A classe PR é garantida, admitindo o maior erro composto especificado, expresso em porcentagem, medido na corrente nominal, multiplicada pelo fator limite de exatidão especificado, seguido pela designação PR (proteção de baixa remanência). O fator de remanência não pode exceder 10%. Assim, como na classe de exatidão P, os limites de erro são os mesmos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992b).

A corrente primária nominal é o valor que consta da especificação de um transformador de corrente e determina as suas condições de funcionamento. É definida como a corrente que percorre o enrolamento primário de um transformador de corrente.

Os valores normalizados de corrente primária nominal são preferencialmente: 10 A, 15 A, 20 A, 30 A, 40 A, 50 A, 60 A, 75 A e seus múltiplos e submúltiplos decimais. No Brasil, para fabricação dos transformadores de corrente são estabelecidos valores de correntes primárias nominais ( $I_p$ ), dentro de uma faixa que varia de 5 A a 8000 A. Já, a corrente secundária nominal ( $I_s$ ), é padronizada em 5 A. Porém, correntes de 1 A e 2 A podem ser utilizadas também.

A corrente secundária nominal é a corrente que flui no enrolamento secundário e no circuito secundário de um transformador de corrente, quando se aplica corrente no primário. Ela deve ser escolhida de acordo com a instalação do transformador. Os valores considerados padrões são 1 A e 5 A.

A norma especifica as correntes primárias e as relações nominais para TC em grupos, tabela 4. Esses grupos caracterizam os tipos de relações nominais: simples, duplas, triplas e múltiplas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992b). A carga nominal é a carga na qual se baseiam os requisitos de exatidão de um transformador para instrumentos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992b).

Nos transformadores de corrente, a carga secundária representa o valor ôhmico das impedâncias, formadas pelos diferentes aparelhos que são ligados ao seu secundário (Bastos, 2004).

As cargas nominais especificadas, segundo NBR 6856 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992b), são designadas por um símbolo formado pela letra C, seguida de um número. Esse número representa em volt-ampères o quadrado da corrente

secundária nominal multiplicada pela impedância da carga nominal. Já, na designação da IEEE, a carga nominal é representada pela letra B, seguida de um número que corresponde diretamente ao valor da impedância da carga nominal em ohms.

O fator térmico é um fator que multiplica a corrente primária nominal de um transformador de corrente, para obter a corrente primária máxima que ele pode conduzir, em regime contínuo, à frequência nominal, com a maior carga especificada, sem exceder os limites de elevação de temperatura e da classe de exatidão especificados (Bandeira, 2004).

Os transformadores de corrente podem ser classificados em dois tipos quanto ao serviço a que se destinam: TC para serviço de medição e TC para serviço de proteção (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992b).

Os transformadores de corrente destinados à medição têm seus limites pré-estabelecidos, delimitando os erros máximos que eles estão sujeitos, quando o fator de potência da carga medida esteja entre 0,6 e 1,0 indutivos (Borges, 2014).

A classe de exatidão estabelece parâmetros para o projeto, teste e classificação dos equipamentos fabricados e devem ter uma boa exatidão no domínio da corrente nominal até sua corrente máxima, determinada pelo fator térmico. Segundo a norma NBR 6856:2015 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015), eles são enquadrados nas classes de exatidão, os quais são classificados nas classes 0,3, 0,6, 1,2.

### 3 Materiais e métodos

O objetivo deste trabalho é reutilizar o núcleo de silício, parado em estoque, devido ao erro de dimensionamento seja por erro de altura, quantidade de núcleos ou quantidades de camadas.

O núcleo de silício é o principal componente do transformador de corrente, gerando um grande impacto, em caso de erro de projeto. Para reutilizar um núcleo de silício projetado originalmente para outro transformador, é necessário que se faça um novo projeto, adequando as dimensões do núcleo já cortado, em um novo transformador de corrente.

Inicialmente, o transformador de corrente é dimensionado por meio de uma planilha eletrônica parametrizada com as equações definidas por norma e disponibilizada pela empresa. Nessa planilha, é possível definir o tipo de bucha que será instalada, as dimensões internas e externas, a quantidade de camadas, a classe de exatidão e a norma estabelecida para o país no qual será utilizado. Com o dimensionamento,

é possível verificar, por exemplo, a quantidade de núcleos que devem ser usados, comprimento do fio de cobre e a quantidade de camadas para o enrolamento.

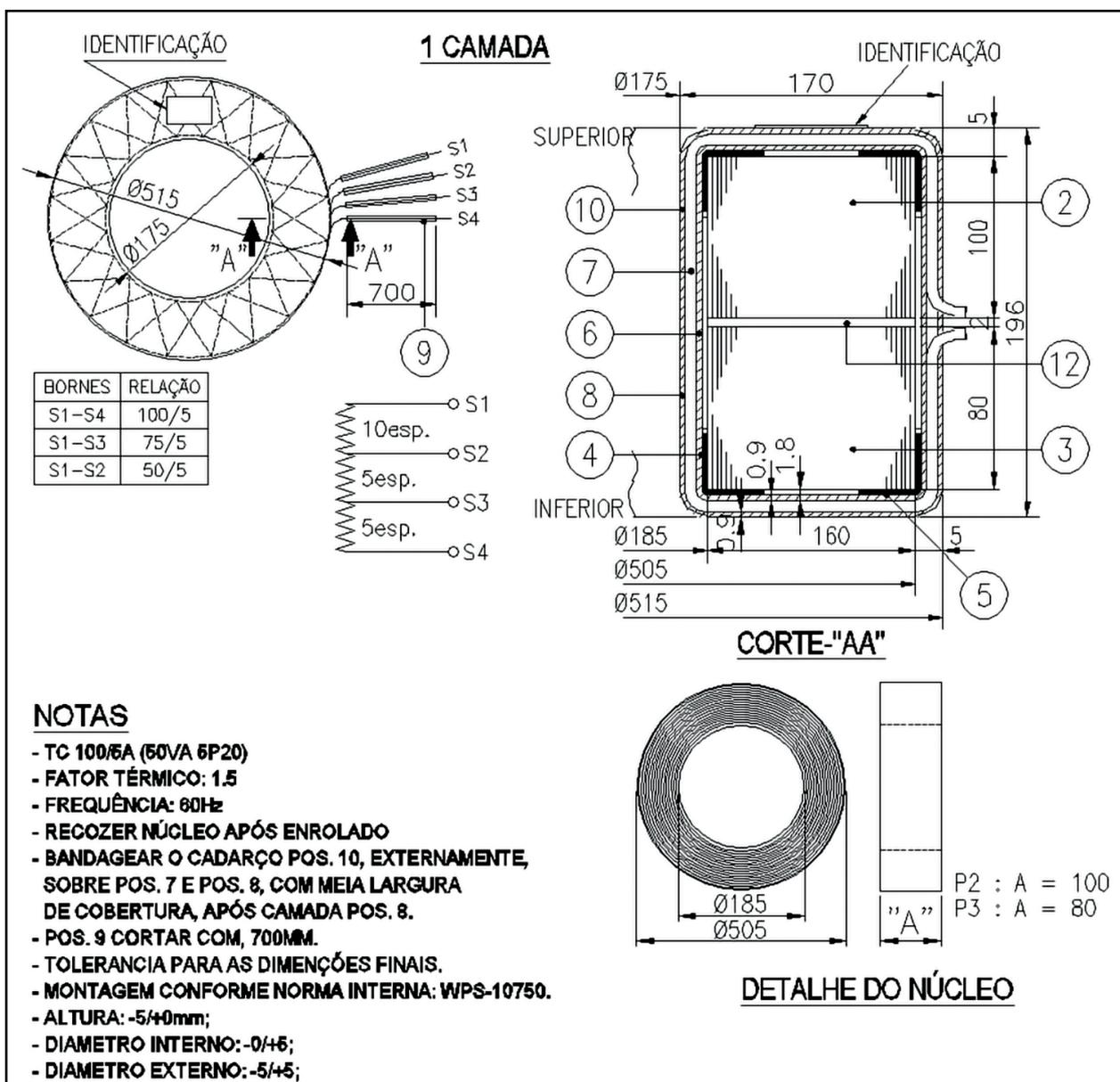
Após a fabricação do transformador de corrente com o núcleo de silício reutilizado e, para confirmar a sua funcionalidade, são realizados ensaios para avaliação do desempenho que permita a utilização para os seus devidos fins.

O processo de fabricação do protótipo segue as etapas descritas a seguir: etapa 1: fabricação do transformador de corrente conforme dimensionamento;

etapa 2: ensaios para avaliação do desempenho e funcionamento do TC; etapa 3: ensaios direcionados ao erro composto, erro de fase e erro de sobrecorrente; etapa 4: realização de testes para alteração do erro classe 10P par 5P; etapa 5: montagem do protótipo com canal entre os núcleos; etapa 6: ensaios funcionais do protótipo e etapa 7: resultados dos ensaios.

Depois do dimensionamento, é criado o projeto e enviado para a fabricação do transformador de corrente, conforme figura 3, na própria empresa em que foram definidos os seus parâmetros.

Figura 3 – Representação da localização e saídas do TC para instrumentação



Fonte: Os autores (2022).

O transformador de corrente é enviado para ensaio de bancada no laboratório, para verificação da qualidade, uniformidade da mão de obra e dos materiais, empregados na fabricação dos TCs, e que são exigidos pela norma NBR 6856:2015 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015). Os ensaios são: tensão induzida; tensão suportável à frequência industrial; descargas parciais; polaridade; exatidão; fator de potência de isolamento capacitância e resistência mecânica à pressão interna.

Para comprovar se um determinado modelo ou tipo de TC é capaz de funcionar, são realizados os ensaios de tipo que precisam satisfazer as condições a seguir: todos os ensaios especificados anteriormente; resistência dos enrolamentos; tensão suportável de impulso atmosférico do núcleo; tensão suportável de impulso de manobra; elevação de temperatura; corrente térmica nominal; radio-interferência (Vn 145 kV) e estanqueidade à quente.

Todos os ensaios são submetidos com base nas normas 6856:2015 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015) e IEC 61869-2 (International Electrotechnical Commission, 2012). Para que sejam realizados os ensaios, é necessário que o transformador de corrente já esteja enrolado e disponível para testes.

O TC é constituído por peças fundamentais em seu funcionamento, são elas: núcleo de silício; mini ângulo interno e externo; fita poliéster; fio de cobre; cabo de silicone; papel isolante e anel isolante.

Para a quantidade de voltas que deverá ter no enrolamento, é calculada a quantidade de espiras necessárias. No caso de um TC com relação de 100

A – 5 A, é necessário dividir a corrente primária pela sua secundária que resultará em 20 espiras. Além desses, existem os processos internos de cada local, onde se fabrica o TC. Nesse caso, como a fabricação é realizada pela própria empresa e por se tratar de um material isolante em que sua base é o papel, é necessário, após a bobinagem, recozer o núcleo para retirar toda e qualquer umidade existente, fazendo com que o núcleo fique o mais próximo do dimensionado com a fabricação.

Figura 4 – Transformador de corrente



Fonte: Os autores (2022).

Com o TC já fabricado, foram iniciados os ensaios com um equipamento de testes de relação de transformação e polaridade dos transformadores de corrente, conforme figura 5.

Figura 5 – Equipamento de testes de relação de transformação e polaridade

	Precisão da relação (para 0 VA até a potência nominal)	
	relação 1 – 2000	0.02 %
	relação 2000 - 5000	0.03 %
	relação 5000 - 10000	0.05 %
	Medição de fase	
	Resolução	0.1 min
	Precisão	1 min (cos φ 0.8 ... 1)
	Medição da resistência de enrolamento	
	Resolução	1 mΩ
	Precisão	típica 0.05 % / garantida 0.1 % + 1 mΩ

Fonte: Omicron (2022).

As saídas do equipamento são conectadas aos cabos de saída do transformador de corrente, para iniciar os testes. Inicialmente, é ensaiado e verificado se a relação definida para o TC está de acordo e que

as bobinas do transformador tenham a quantidade de espiras corretas, para gerar os níveis de tensões adequadas. Em seguida, a prova de polaridade consiste em determinar a conexão eletromagnética do

enrolamento primário e secundário. Para que seja aprovado, os TCs de proteção devem atender a classe de proteção identificada na placa de identificação do respectivo TC. Os TCs de proteção e de medição são projetados com características construtivas distintas. Como a instalação desses TCs

é diferente, os ensaios também são adaptados de acordo com sua aplicação. No TC de 50 VA 5P20, a tensão medida, durante a saturação, deve ser no mínimo 50 V, para que a relação seja aceitável, o resultado deverá ser menor que 5%, considerando sua característica.

Figura 6 – Resultado do teste extraído do equipamento de testes de relação de transformação e polaridade

TC N°	EXATIDÃO	RELAÇÃO	LINHAS	F.T.	USO
1-6	50VA 5P20	100-5A	S1-S4	1,5	PROTEÇÃO
	-	75-5A	S1-S3		
	-	50-5A	S1-S2		

Fonte: Omicron (2022).

Conforme a figura 6, podem ser analisados os dados na placa de identificação do TC. Nesse caso, é solicitado que o TC atenda a exatidão de 50 VA 5P20 com sua relação de 100 A de corrente primária e 5 A de corrente secundária. Por conseguinte, é dimensionado com essas características, comprovando a possibilidade de utilizar o núcleo em diferentes projetos.

Sendo assim, foi utilizado um TC que foi rejeitado nos ensaios do equipamento por erro de projeto. O TC foi dimensionado para a exatidão de 50 VA 10P20 e seu erro para 10%, onde 10P20 limita a classe de

exatidão de 10% com fator-limite de exatidão 20 vezes a corrente nominal, ou seja, o erro composto não poderá ultrapassar 10% do erro composto da corrente primária, e o limite de erro de corrente na corrente primária nominal é de +/-3%.

Dessa forma, tem-se a análise de um método de adequação de um TC com erro de 10% para 5%, que possuirá impactos no erro composto da corrente primária, que deverá ser de 5% e o erro de corrente na corrente primária nominal de +/-1%. Conforme figura 7, podem ser analisados esses dados.

Figura 7 – Limites de erro para transformadores de corrente para proteção classe P

Classe de exatidão	Erro de corrente para a corrente primária nominal %	Defasagem para corrente nominal		Erro composto da corrente primária limite de exatidão %
		Minutos	Centirradianos	
5P	± 1	± 60	± 1,8	5
10P	± 3	-	-	10

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015).

Com o ensaio realizado no transformador de corrente com exatidão de 50 VA 10P20, foram obtidos resultados satisfatórios e o *status* de aprovado, conforme norma NBR 6856:2015 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015). Alterando a exatidão para 50 VA 5P20 e modificando os parâmetros do equipamento, foram obtidos resultados insatisfatórios e *status* de reprovado, conforme norma NBR 6856:2015 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015).

Um método utilizado para o ajuste do erro de relação é retirar uma fração de espira que consiste

em diminuir o comprimento do fio que está sendo utilizado para enrolar as camadas e, em seguida, é adicionado mais um fio em paralelo nestas camadas, desse modo, o ajuste do erro de relação deve ficar entre o estabelecido de +/-1%.

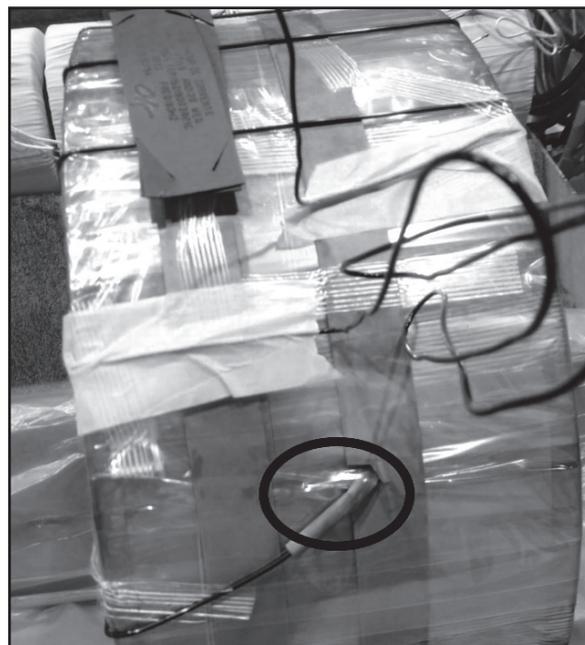
Como exemplo, foi utilizado um TC com relação 100-5 A e exatidão 50 VA 10P20 que foi ensaiado para adequação ao erro de 5P. Esse deve ter, ao total, 20 espiras enroladas em seu núcleo. Com a retirada de uma fração de espira, passará a ter aproximadamente 19,5 espiras. Um dos fios será enrolado no TC com o

total de 19,5 espiras, e o outro fio será enrolado com 19 voltas. Essa diferença de quantidade de espiras enroladas, torna a indução do TC maior e, dessa forma, normaliza o erro de relação.

No entanto, foi observado que, ao diminuir a quantidade de fios, o erro de relação foi se ajustando, e o erro de fase começou a defasar e, de acordo com o permitido por norma, deve ficar entre +/-60 min, e ele atingiu aproximadamente +92 min. Importante lembrar que, se esse TC estivesse sendo utilizado para atender ao erro de 10P, seria aprovado, pois, nesse caso, não há um limite de fase. Com o intuito de ajustar a defasagem do TC, foram realizados testes aumentando, diminuindo e retirando espiras e pode-se notar que tais testes somente alteraram o erro de relação. Por conseguinte, foi inserido em um dos núcleos um canal feito com material de fenolite. Esse canal atravessa o núcleo verticalmente até sua base, contendo a mesma altura do núcleo. Em seguida, utilizou-se a espira 19 do TC que passa pelo canal, conforme figura 8.

Portanto, esse canal funcionará como um espaçador entre os núcleos, isolando um do outro e criando uma indução diferente entre os núcleos. Para TCs de proteção, não é observada nenhuma restrição relacionada ao erro do ângulo de fase, conforme a norma NBR 6856:2015 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015), admitindo-se limites para o erro de corrente de 5% ou 10%.

Figura 8 – TC com espaçador de fenolite



Fonte: Os autores (2022).

#### 4 Resultados e discussões

O TC série 64766 foi utilizado para demonstração dos testes e parâmetros que foram aprovados e reprovados. Na figura 9, é possível identificar os resultados analisados pelo CT Analyzer, configurado para a relação de 100-5 A e exatidão 50 VA 10P20.

Figura 9 – Resultados teste 50 VA10P20 – 100-5A

NS.:	64766
Relação:	100-5A
Exatidão:	50VA 10P20
Freq.:	60Hz
Classe:	10P
Norma:	IEC 61869-2
Potência:	50

	10P	5P
Erro de relação	± 3	± 1
Erro de Fase	-	± 60
Erro composto	10%	5%
Polaridade	Positiva	Positiva

Resultados:	Relação	Relações de Espiras	Relação de Corrente	Erro de relação	Erro de Fase	Erro composto	ALF (20)
S1-S4	100	20	4,897328	-2,0534%	21,85min	2,16%	27,08
S1-S3	75	15	4,86317	-2,7367%	29,302min	2,90%	27,15
S1-S2	50	10	4,796403	-4,0720%	44,168min	4,29%	27,46

Fonte: Os autores (2022).

Pode-se avaliar que os erros de corrente estão próximos da corrente secundária com aproximadamente 4,9 A, apontando um erro de relação -2,0534% e seu erro composto para maior relação de 2,16%. Nesse limite de erro, 10P não é levado em consideração o erro de fase, pois não é exigido.

No equipamento de análise, foram alterados os parâmetros para verificar o mesmo TC, no entanto, utilizando-se a exatidão 50 VA 5P20. Para se adequar a norma, o limite de erro de relação para o erro 5P é de +/-1%. Conforme figura 10, é notável que o erro de relação está acima do estipulado, acusando -2,1644%,

e o erro de fase também ultrapassa o limite estabelecido por norma com 72,42 min.

Com os indicadores de relação e fase fora do normal, foram necessários alguns testes com o

intuito de corrigir os erros, sem alterar as dimensões do núcleo. Mesmo com a aplicação de testes, modificando espiras e camadas, não foram obtidos resultados satisfatórios.

Figura 10 – Resultado Teste 50 VA 5P20

NS.:	64766
Relação:	100-5A
Exatidão:	50VA 5P20
Freq.:	60Hz
Classe:	10P
Norma:	IEC 61869-2
Potência:	50

	10P	5P
Erro de relação	± 3	± 1
Erro de Fase	-	± 60
Erro composto	10%	5%
Polaridade	Positiva	Positiva

Resultados:	Relação	Relações de Espiras	Relação de Corrente	Erro de relação	Erro de Fase	Erro composto	ALF(20)
S1-S4	100	20	4,891800	-2,1644%	72,42min	5,17%	20,42
S1-S3	75	15	4,855421	-2,8916%	82,01min	5,99%	21,52
S1-S2	50	10	4,784517	-4,3096%	92,2min	6,42%	21,82

Fonte: Os autores (2022).

Após testes de bancada permanecerem com os erros, foi incluído um canal entre os núcleos, com o propósito de criar uma indução, além das já existentes. Esse canal atravessa o segundo núcleo e por ele é passado o fio da camada 19 e, por fim, é ligado à saída do TAP S2. Com a montagem do canal, conforme figura 11, foi encaminhado aos testes e verificada sua adequação, conforme figura 12.

Figura 11 – Canal núcleo TC



Fonte: Os autores (2022).

Pode-se avaliar que a relação de corrente chega a 5,000009 A, e o erro de relação fica em torno de 0,0003%, já o erro de fase foi normalizado e dentro do permitido, chegando as 23,712 min. Com o ajuste do canal, o erro de fase e erro composto ficaram dentro do permitido pelas normas

Dessa forma, foi criada uma maneira mais simplificada de adaptar um transformador de corrente de aceitação do erro 10P para o erro 5P. Geralmente os TCs de erro 5P são os mais críticos de se criar e fabricar, gerando altos custos em caso de erros sem solução. De acordo com a norma NBR 6821 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992a), os ensaios de verificação da exatidão de TCs de proteção são realizados pelo método indireto, determinando-se o erro composto e não valores distintos de erro de relação e de ângulo de fase.

A exatidão dos TCs é verificada pela aplicação de procedimentos padronizados (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992a). Para os TCs de proteção, a exatidão é avaliada, através de ensaios realizados por método indireto. Dessa maneira, determina-se o erro composto, sem a necessidade de determinar valores distintos de erro de relação e erro de fase.

Na figura 13, há a representação do canal inserido entre os núcleos no projeto.

A análise final, com a inserção do canal entre os núcleos, criou uma indução independente da indução já gerada normalmente entre um núcleo e outro. Devido ao fato de a última espira passar pelo canal, possibilitou essa nova indução, aperfeiçoando o ângulo de fase para o permitido.

Figura 12 – Resultado teste 50 VA 5P20 com canal

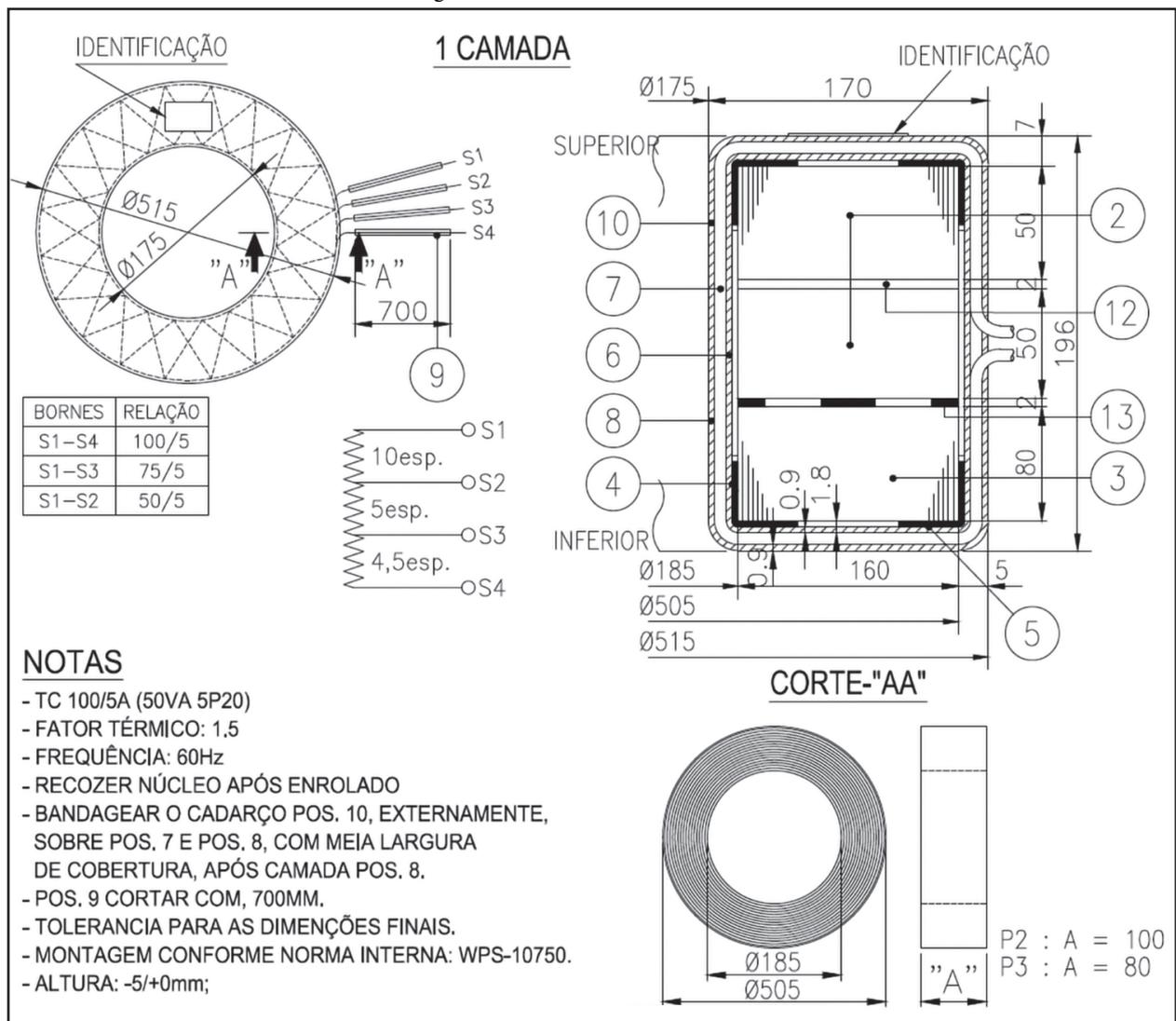
NS.:	64766		
Relação:	100-5A		
Exatidão:	50VA 5P20		
Freq.:	60Hz		
Classe:	10P		
Norma:	IEC 61869-2		
Potência:	50		

	10P	5P
Erro de relação	± 3	± 1
Erro de Fase	-	± 60
Erro composto	10%	5%
Polaridade	Positiva	Positiva

Resultados:	Relação	Relações de Espiras	Relação de Corrente	Erro de relação	Erro de Fase	Erro composto	ALF (20)
S1-S4	100	19,56	5,000009	0,0003%	23,712min	0,71%	25,64
S1-S3	75	15	4,855861	-2,8828%	31,458min	3,04%	26,65
S1-S2	50	10	4,785145	-4,2972%	47,396min	4,54%	26,55

Fonte: Os autores (2022).

Figura 13 – TC Classe 50 VA 5P20



Fonte: Os autores (2022).

## 5 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um método desenvolvido para reaproveitar os núcleos de silício de TCs de proteção, que são descartados, devido a erros de dimensionamento, a partir de testes de bancada em laboratório industrial. Desse modo, o erro de fase, para a relação de 100-5 A, cumpre os requisitos da norma, apresentando 23,712 min.

Os núcleos de silício seriam normalmente descartados por erro de projeto. Para tanto, foram executados todos procedimentos e ensaios de fabricação de um TC, comprovando a viabilidade e importância, tanto econômica quanto sustentável do reaproveitamento desse recurso. Sendo assim, é possível analisar que o fator de sobrecorrente (ALF) não sofre alterações, caso o erro seja alterado em 10% e 5%, mas impacta no erro de fase e relação.

Este estudo é uma forma de trazer os aspectos técnicos que comprovam por desenvolvimento e aplicação do método de reutilização dos núcleos de silício na produção dos transformadores de corrente, mas além disso, busca mostrar a possibilidade de outras formas de melhoria, sejam econômicas ou ambientais, nos processos de reaproveitamento de materiais, pois motiva criação e busca de novos mecanismos para eficiência no desenvolvimento de projetos.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6546**: transformadores para instrumentos: terminologia. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6821**: transformador de corrente: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6856**: transformador de corrente: especificação. Rio de Janeiro, 1992b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6856**: transformador de corrente: especificação. Rio de Janeiro, 2015.

BANDEIRA, M. I. C. **Automação do ensaio de saturação em transformadores de corrente utilizados em sistemas de transmissão de energia**. 2004. 129 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para a engenharia: estática e quase-estática**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2004.

BORGES, F. A. **Modelagem dinâmica de transformadores de corrente para uso em estudos de qualidade da energia**

**e proteção do sistema elétrico**. 2014. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, 2014.

D'AJUZ, A. **Equipamentos elétricos: especificação e aplicação em subestações de alta tensão**. Rio de Janeiro: FURNAS, 1985.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Electric machinery**. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std C57.13-1993**: standard requirements for instrument transformers. New York, 1994.

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60044-1**: instruments transformers: part 1: current transformers. Geneva, 2003.

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60044-6**: instruments transformers: part 6: requirements for protective current transformers for transient performance. New York, 1992.

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61869-2**: instrument transformers – part 2: additional requirements for current transformers. Geneva, 2012.

OMICRON. **CT Analyzer**: current transformer testing, calibration and assessment. 2022. Disponível em: <https://www.omicronenergy.com/en/products/ct-analyzer/>. Acesso em: 10 dez. 2022.

PIRES, T. T. B. **Avaliação do transformador de corrente da linha de transmissão de 138 kV quanto as suas condições operacionais**. 2018. 159 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2018.

SCHIMITZ, J. S. **Estudo e aprimoramento de método de cálculo para fabricação de um transformador de corrente para medição**. 2016. Trabalho de Conclusão do Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Pontífice Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2014.

VICENTE, F. **Estudo e aprimoramento de planilha para cálculo de transformadores de corrente**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Pontífice Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.