

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* IPATINGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Gustavo dos Santos Marciano
João Vitor Santos da Costa

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA AUXÍLIO NO
DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE**

Ipatinga
2026

GUSTAVO DOS SANTOS MARCIANO
JOÃO VITOR SANTOS DA COSTA

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA AUXÍLIO NO
DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica do
Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus*
Ipatinga para obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Felipe Antunes

M298d Marciano, Gustavo dos Santos; Costa, João Vitor Santos da

Desenvolvimento de software para auxílio no dimensionamento de transformadores de corrente. Gustavo dos Santos Marciano; João Vitor Santos da Costa. – 2026.

74f.;il.

Orientador: Felipe Antunes.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Ipatinga*, 2026.

1. Aplicativo. 2. Desenvolvimento de *software*. 3. Transformadores elétricos. I. Antunes, Felipe. II. Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus Ipatinga*. III. Título.

CDD 621.314

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907

Gustavo dos Santos Marciano

João Vitor Santos da Costa

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA AUXÍLIO NO
DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica do
Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus*
Ipatinga para obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Felipe Antunes

Aprovado em: ____/ ____/ _____ pela banca examinadora:

Nome do Professor

Nome do Professor

Nome do Professor

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar de forma detalhada todas as etapas necessárias para o dimensionamento de transformadores de corrente (TCs), em conformidade com as normas ABNT NBR 6856 e ANSI/IEEE C57.13. Além disso, propõe o desenvolvimento de um software voltado ao auxílio de profissionais da área elétrica no correto dimensionamento desses equipamentos, a partir dos dados de projeto. A utilização da ferramenta visa reduzir erros de cálculo, minimizar perdas materiais e financeiras no ambiente de trabalho e promover maior eficiência no processo de seleção e especificação dos TCs. O estudo também aborda os diferentes tipos de transformadores de corrente, suas características construtivas e particularidades, bem como o princípio de funcionamento, circuito equivalente e curvas de magnetização, saturação e histerese. Por fim, demonstra-se a viabilidade prática do software por meio da comparação entre os resultados obtidos com o programa e os valores de dimensionamento real, a partir de estudos de caso, evidenciando sua precisão e aplicabilidade técnica conforme as normas mencionadas.

Palavras chaves: Transformador de corrente, dimensionamento, aplicativo, desenvolvimento de software, estudo de caso.

ABSTRACT

This work aims to present, in detail, all the necessary steps for the sizing of current transformers (CTs), in accordance with the ABNT NBR 6856 and ANSI/IEEE C57.13 standards. Furthermore, it proposes the development of an educational software designed to assist electrical engineering professionals in the correct sizing of these devices based on project data. The use of this tool seeks to reduce calculation errors, minimize material and financial losses in the workplace, and promote greater efficiency in the process of selecting and specifying CTs. The study also discusses the different types of current transformers, their constructive characteristics and particularities, as well as their operating principles, equivalent circuits, and magnetization, saturation, and hysteresis curves. Finally, the practical feasibility of the software is demonstrated through a comparison between the results obtained by the program and the actual sizing values, based on case studies, evidencing its accuracy and technical applicability in accordance with the aforementioned standards.

Keywords: Current transformer, sizing, application, software development, case study.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Núcleo magnético simples	15
Figura 2 - Curva de magnetização.	16
Figura 3 - Esquema de ligação do TC.....	18
Figura 4 - Construção do TC tipo barra.	19
Figura 5 - Representação do TC tipo enrolado.....	19
Figura 6 - Representação do TC tipo janela.	20
Figura 7 - Representação do TC tipo bucha.	21
Figura 8 - Representação do TC tipo núcleo dividido.	22
Figura 9 - Circuito equivalente.....	23
Figura 10 - Representação do secundário do TC com circuito aberto.....	24
Figura 11 - Fator de relação x ângulo de fase.	31
Figura 12 - Fluxograma parte 1.	40
Figura 13 - Fluxograma parte 2.	41
Figura 14 - Tela inicial.....	43
Figura 15 - Segunda tela.....	44
Figura 16 - Terceira tela.....	45
Figura 17 - Quarta tela	46
Figura 18 - Desbloquear o macro de uma planilha.	47
Figura 19 - Tela de informação de projeto.....	54
Figura 20 - Tela para inserção dos dados para calcular o TC.	54
Figura 21 - Tela dos equipamentos do secundário do TC.....	55
Figura 22 - Tela de Resultados.	56
Figura 23 - Relatório gerado pelo aplicativo.....	57
Figura 24 - Tela de informação de projeto.....	58
Figura 25 - Tela para inserção dos dados para calcular o TC.	59
Figura 26 - Tela dos equipamentos do secundário do TC.....	59
Figura 27 - Tela de Resultados.	60
Figura 28 - Relatório gerado pelo aplicativo.....	61
Figura 29 - Coordenograma aprovado pela concessionária.	69
Figura 30 - Coordenograma folha 7.....	70
Figura 31 - Coordenograma folha 8.....	71
Figura 32 - Coordenograma folha 9.....	72
Figura 33 - Coordenograma folha 10.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correntes primárias e relações nominais.	25
Tabela 2 – Possíveis combinações da classe de exatidão de acordo com a ABNT 1992.	32
Tabela 3 - Possíveis combinações da classe de exatidão da norma ANSI.....	32
Tabela 4 - Possíveis combinações da classe de exatidão da norma ABNT 2021.....	33
Tabela 5 - Equipamentos conectados no secundário do TC.....	50
Tabela 6 – Impedância dos condutores.	51
Tabela 7 – Resultados do estudo de caso 2.	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Ampere

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSI - American National Standards Institute

b - Ângulo de fase

C_s - Carga ligada ao secundário, em VA

C_n - Carga nominal, em VA

dl - elemento diferencial de comprimento ao longo do caminho magnético

ed. - Edição

f. - folha

F_1 - Carga corrigida ligada ao secundário, em VA

FCR_r - Fator de correção de relação real

FCT_p - Fator de correção de transformação percentual

F_s - Fator de sobrecorrente nominal ou de segurança

H - Intensidade do campo magnético

i - Corrente elétrica que percorre o enrolamento

I_1 - Corrente no primário do TC

I'_1 - Corrente do primário referida ao secundário

I_2 - Corrente no secundário do TC

I_e - Corrente no ramo de magnetização do TC

IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers

I_p - Corrente do enrolamento primário

I_s - Corrente do enrolamento secundário

N - Número de espiras do TC

NBR - Norma Brasileira Regulamentar

N_p - Número de espiras no primário

N_s - Número de espiras no secundário

p - Página

P_1 - Contato 01 do enrolamento primário

P_2 - Contato 02 do enrolamento primário

R_1 - Resistência do enrolamento primário

R'_1 - Resistência do enrolamento primário referida ao enrolamento do secundário

R_2 - Resistência do enrolamento secundário

RTC - Relação de transformação de corrente nominal

RTC_r - Relação de transformação de corrente real

S_1 - Contato 01 do enrolamento secundário

S_2 - Contato 02 do enrolamento secundário

S_{TCnom} - Potência nominal do TC

TC - Transformador de corrente

TP - Transformador de potencial

V - Volts

X_1 - Reatância do enrolamento primário

X'_1 - Reatância do enrolamento do primário referida ao enrolamento do secundário

X_2 - Reatância do enrolamento secundário

X_m - Reatância do ramo de magnetizante

Z_c - Impedância da carga

Z_{TCnom} - Impedância nominal do TC

$\oint$ - Integral de linha ao longo de um caminho fechado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos gerais.....	12
1.2	Objetivos específicos.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Aspectos gerais dos transformadores elétricos	14
2.2	Curva de Magnetização, Saturação e Histerese	15
2.3	Tipos de Transformadores de corrente	17
2.3.1	TC tipo Barra.....	18
2.3.2	TC tipo Enrolado.....	19
2.3.3	TC tipo Janela	20
2.3.4	TC tipo Bucha	21
2.3.5	TC Tipo Núcleo Dividido	22
2.4	Características elétricas.....	22
2.4.1	Circuito Equivalente.....	23
2.4.2	Relação de transformação	24
2.4.3	Corrente nominal.....	25
2.4.4	Carga Nominal	26
2.4.5	Fator de sobrecorrente	27
2.4.6	Erros de relação de transformação	28
2.4.7	Erros de ângulo de fase.....	29
2.4.8	Classe de Exatidão.....	31
2.4.9	Tensão Secundária.....	35
2.4.10	Tensão no Ponto de Joelho (Knee-point).....	35
2.4.11	Fator Térmico Nominal	36
2.4.12	Corrente dinâmica nominal.....	37
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	Dimensionamento do TC	38
3.2	Desenvolvimento do software.....	42
3.2.1	Primeira tela	42
3.2.2	Segunda tela	43
3.2.3	Terceira tela.....	45
3.2.4	Quarta tela.....	46
3.2.5	Desbloqueio do macro	47
3.2.6	Utilizando o software.....	47
3.3	Estudo de caso 1	49
3.4	Estudo de caso 2	49

4	RESULTADOS	53
4.1	Simulação do estudo de caso 1.....	53
4.2	Simulação do estudo de caso 2.....	58
5	CONCLUSÃO	62
6	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A - CÓDIGO DA PRIMEIRA TELA.....	65
	APÊNDICE B - CÓDIGO DA SEGUNDA TELA.....	66
	APÊNDICE C - CÓDIGO DA TERCEIRA TELA	67
	APÊNDICE D - CÓDIGO DA QUARTA TELA.....	68
	ANEXO A - COORDENOGRAMA PSO	69

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores de corrente (TCs) são dispositivos utilizados na medição e na proteção de sistemas elétricos. Esses equipamentos realizam a adequação das grandezas elétricas para instrumentos de medição e relés de proteção, permitindo a operação de redes elétricas, tanto de alta quanto de baixa tensão. Sua função é reduzir correntes a níveis padronizados para uso em sistemas de controle e monitoramento (MAMEDE FILHO, 2000).

Segundo Mardegan, o TC é um equipamento monofásico que possui dois enrolamentos, um denominado primário e outro denominado secundário, sendo isolados eletricamente um do outro, porém, acoplados magneticamente, os quais são usados para reduzir a corrente a valores baixos (normalmente 1 ou 5A) com as seguintes finalidades básicas: promover a segurança do pessoal; isolar eletricamente o circuito de potência dos instrumentos; padronizar os valores de corrente de relés e medidores.

Segundo Kindermann, o transformador de potencial (TP) é um equipamento projetado especificamente para fornecer sinais de tensão destinados a instrumentos de medição, controle e proteção. Sua função principal é reproduzir, no secundário, uma tensão proporcional à do sistema elétrico, buscando o menor erro possível. Dessa forma, a tensão secundária deve representar uma versão em escala da tensão presente no circuito primário.

O princípio de funcionamento dos TCs é similar ao dos transformadores de potencial (TPs), com a diferença de que, enquanto os TPs convertem tensão, os TCs realizam a conversão de corrente. Este processo ocorre por meio da relação de transformação entre os enrolamentos primário e secundário. A corrente do circuito primário, que representa a corrente do sistema de alta potência, percorre o enrolamento primário, e o número de espiras no enrolamento secundário define o valor da corrente reduzida, que será usada para medição ou proteção. Essa transformação é crucial para assegurar medições precisas e para a proteção dos sistemas elétricos contra falhas (MAMEDE FILHO, 2000).

A aplicação dos TCs é abrangente, sendo encontrados em sistemas de distribuição, transmissão de energia elétrica, subestações e circuitos industriais. De acordo com a ABNT NBR 6856 (2021), os TCs devem atender a critérios de segurança e desempenho, especialmente no que diz respeito à isolamento sólida para tensões de até 52 kV, o que garante a proteção contra curtos-circuitos e outros eventos anormais. Esses transformadores são projetados para fornecer uma corrente proporcional, utilizada para fins de medição e proteção do sistema elétrico de

potência (SEP).

Além de sua função principal de medição, os TCs têm um papel essencial na segurança dos sistemas elétricos. Eles fornecem sinais de corrente para relés de proteção, que, ao detectarem condições anormais, como sobrecargas ou curtos-circuitos, são capazes de interromper rapidamente a alimentação do circuito, evitando danos a equipamentos e promovendo a integridade da rede elétrica (MAMEDE FILHO, 2000). Dessa forma, a confiabilidade e a robustez desses dispositivos são fundamentais para a operação segura de redes elétricas, especialmente em ambientes de alta tensão, onde a precisão e a segurança são requisitos imprescindíveis. Nesse sentido, a motivação deste trabalho está relacionada à necessidade de dispor de uma ferramenta que auxilie estudantes e profissionais na compreensão do processo de dimensionamento de TCs, integrando os conceitos teóricos à prática de projeto. O desenvolvimento de um software que busca facilitar a análise dos parâmetros elétricos, apoiar a tomada de decisão em projetos e contribuir para um aprendizado mais prático e eficiente, alinhado às exigências técnicas.

1.1 Objetivos gerais

Desenvolver um software computacional para auxiliar no correto dimensionamento de transformadores de corrente (TC), em conformidade com os critérios estabelecidos pelas normas ABNT NBR 6856 e ANSI/IEEE C57.13, permitindo a análise técnica e a verificação de parâmetros elétricos relevantes ao projeto.

1.2 Objetivos específicos

- Estudar e descrever as características construtivas e funcionais dos transformadores de corrente, incluindo os tipos barra, enrolado, janela, bucha e núcleo dividido;
- Apresentar e analisar as principais grandezas e parâmetros elétricos dos TCs, tais como circuito equivalente, relação de transformação, corrente nominal, carga nominal, fator de sobrecorrente, erros de relação e de ângulo de fase, classe de exatidão, tensão secundária,

tensão no ponto de joelho (*knee-point*), fator térmico nominal e corrente dinâmica nominal;

- Levantar e sistematizar os critérios de dimensionamento de transformadores de corrente estabelecidos pelas normas ABNT NBR 6856 e ANSI/IEEE C57.13;
- Implementar, no software proposto, os métodos de cálculo necessários para o dimensionamento adequado de transformadores de corrente, a partir de dados de entrada fornecidos pelo usuário;
- Desenvolver funcionalidades que permitam a geração automática de relatórios técnicos, contendo os resultados dos cálculos realizados e a verificação de conformidade com as normas aplicáveis;
- Validar o software desenvolvido por meio de estudos de caso, demonstrando sua aplicabilidade, confiabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar os principais conceitos e fundamentos teóricos relacionados aos transformadores de corrente (TCs). Inicialmente, são descritos os diferentes tipos construtivos de TCs, abrangendo os modelos tipo barra, enrolado, janela, bucha e núcleo dividido, destacando-se suas características, princípios de funcionamento e aplicações mais comuns. Na sequência, são discutidas as características elétricas fundamentais desses equipamentos, com ênfase no circuito equivalente, relação de transformação, corrente nominal, carga nominal e fator de sobrecorrente, parâmetros essenciais para a correta especificação e análise de desempenho. Também são abordados os erros de relação de transformação e de ângulo de fase, que influenciam diretamente a classe de exatidão e a tensão secundária do transformador. Aspectos complementares, como a tensão no ponto de joelho (*knee-point*), o fator térmico nominal e a corrente dinâmica nominal, são discutidos visando compreender o comportamento do TC sob condições normais e transitórias de operação. Por fim, são analisadas as curvas de magnetização, considerando os fenômenos de saturação e histerese, bem como a representação do TC para o cálculo de transitórios, proporcionando uma base teórica consistente.

2.1 Aspectos gerais dos transformadores elétricos

De acordo com (Fitzgerald; Kingsley; Umans, 2014), um transformador é um dispositivo formado por dois ou mais enrolamentos acoplados por um núcleo magnético comum, no qual, ao se alimentar o enrolamento primário com uma tensão alternada, estabelece-se um campo magnético variável no núcleo, responsável pela criação de um fluxo magnético alternado cuja intensidade depende da tensão aplicada, da frequência e do número de espiras do primário; parte desse fluxo, denominado fluxo mútuo, percorre o núcleo e envolve o enrolamento secundário e, como consequência, ocorre o fenômeno da indução eletromagnética, gerando uma tensão no secundário diretamente relacionada à variação do fluxo magnético no tempo. O núcleo magnético desempenha papel fundamental nesse processo, pois sua magnetização permite a condução eficiente do fluxo, reduzindo perdas e garantindo um bom acoplamento magnético entre os enrolamentos, sendo que a qualidade do material do núcleo influencia diretamente no desempenho do equipamento; além disso, outro aspecto essencial é a relação de transformação, determinada pela razão entre o número de espiras do primário e do secundário, a qual define como as tensões são elevadas ou reduzidas, possibilitando a obtenção de praticamente qualquer nível de tensão desejado, dentro dos limites construtivos do transformador.

A criação do campo magnético fundamenta-se na circulação de uma corrente elétrica em um condutor. Segundo (Chapman, 2013), um condutor percorrido por uma corrente elétrica é capaz de gerar um campo magnético em sua vizinhança, sendo esse fenômeno a base de funcionamento de transformadores, motores e geradores.

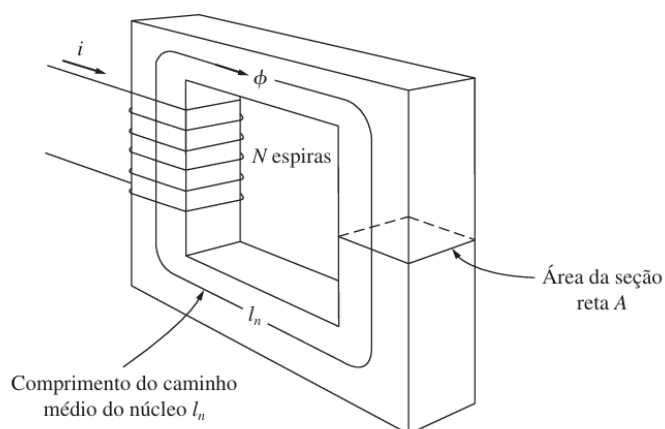
Quando o condutor é disposto na forma de uma bobina com múltiplas espiras, o efeito magnético é intensificado, resultando na concentração do fluxo magnético, especialmente quando associado a materiais ferromagnéticos, que possuem elevada permeabilidade magnética. Dessa forma, o campo magnético produzido depende diretamente da corrente elétrica aplicada e do número de espiras do enrolamento. A relação entre a corrente elétrica e o campo magnético gerado é descrita pela Lei de Ampère, expressa por:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Ni \quad (1)$$

Onde H é a intensidade do campo magnético (A/m), dl é o elemento diferencial de comprimento ao longo do caminho magnético (m), $\oint$ representa a integral de linha ao longo de um caminho fechado, N é o número de espiras da bobina e i é a corrente elétrica que percorre o enrolamento (A).

Em aplicações práticas, para núcleos magnéticos com geometria uniforme, essa relação pode ser simplificada, evidenciando que a intensidade do campo magnético é proporcional ao produto entre o número de espiras e a corrente elétrica, e inversamente proporcional ao comprimento do caminho magnético. Tal princípio constitui a base para a análise de circuitos magnéticos e o dimensionamento de equipamentos eletromagnéticos.

Figura 1 - Núcleo magnético simples



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

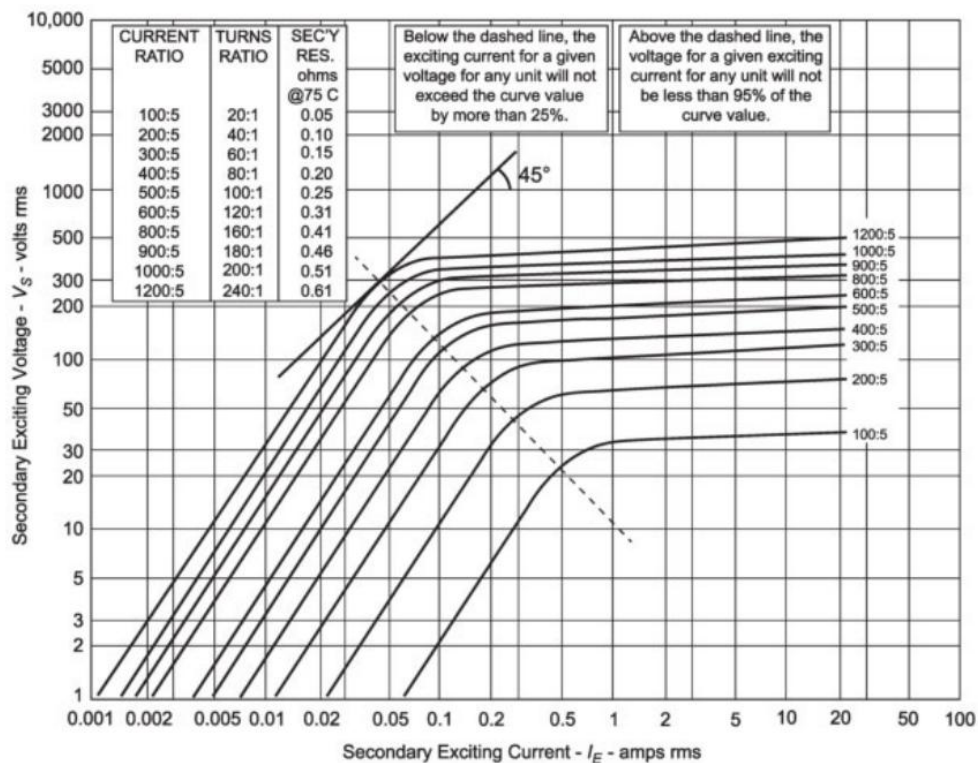
2.2 Curva de Magnetização, Saturação e Histerese

O emprego de materiais ferromagnéticos em núcleos de transformadores é essencial para a canalização eficiente do fluxo magnético. No entanto, o desempenho desses dispositivos é intrinsecamente limitado pelas características não lineares da relação entre a intensidade de campo magnético e a densidade de fluxo resultante. Esses materiais apresentam o fenômeno da saturação, no qual o aumento da excitação não resulta em um acréscimo proporcional do fluxo magnético, impondo um limite operacional ao equipamento. Além disso, o ciclo de magnetização e desmagnetização evidencia a histerese, uma propriedade em que a resposta do material depende do seu histórico de excitação, resultando na retenção de magnetismo residual

(SLEMON, 1974).

Em circuitos magnéticos fechados, como nos transformadores de corrente, pequenas variações na intensidade do campo magnético resultam em aumentos significativos na densidade de fluxo na região linear. Entretanto, à medida que o material se aproxima da saturação, incrementos adicionais na intensidade do campo magnético produzem apenas pequenas variações no fluxo magnético, caracterizando a limitação física do núcleo. Esse fenômeno é conhecido como saturação do material ferromagnético (PRADO, 2017).

Figura 2 - Curva de magnetização.



Fonte: IEEE C37.110-2023

Analisando a Figura 2, observam-se três regiões distintas na curva de magnetização. A primeira é denominada região não saturada, na qual o transformador apresenta comportamento aproximadamente linear, com a tensão de excitação variando proporcionalmente à corrente de excitação, refletindo a relação linear entre o fluxo magnético e o campo magnético no núcleo. Na segunda região, identifica-se o ponto de joelho (*Knee-point*), correspondente à transição em que o material começa a entrar em saturação. Por fim, a terceira região é caracterizada como região saturada, na qual o material passa a apresentar

comportamento não linear.

Esse comportamento está diretamente relacionado à curva de histerese do material, que representa a relação entre o campo magnético aplicado e o fluxo resultante no núcleo. Quando uma corrente percorre o enrolamento primário, é gerada uma força magnetomotriz que induz um campo magnético no núcleo, promovendo o alinhamento progressivo dos domínios magnéticos.

Esse processo, no entanto, não é totalmente reversível. Ao reduzir a corrente, o núcleo não retorna imediatamente ao seu estado inicial, mantendo um certo nível de magnetização residual. Esse comportamento evidencia o fenômeno da histerese, no qual o estado magnético atual do material depende de seu histórico de excitação.

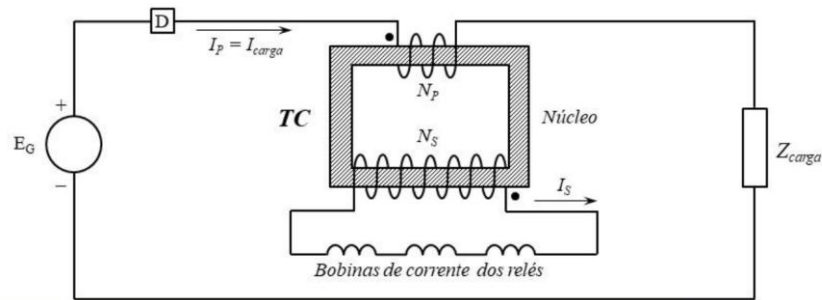
À medida que a excitação magnética aumenta, o material se aproxima da saturação, região em que a maioria dos domínios magnéticos já se encontra alinhada. Nessa condição, grandes variações no campo magnético produzem apenas pequenas alterações no fluxo, caracterizando a resposta não linear do núcleo (SLEMON, 1974).

2.3 Tipos de Transformadores de corrente

De acordo com (KINDERMANN, 2012), um transformador de corrente (TC) é um dispositivo eletromagnético que pode ser usado em sistemas de alta ou baixa tensão com o objetivo de medir correntes elétricas com segurança. Os TCs são utilizados na medição e na proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos. Na Figura 3 apresenta o esquema elétrico de ligação de um transformador de corrente (TC), no qual a tensão da fonte geradora (E_g) alimenta o circuito primário, sendo o enrolamento primário (N_p) conectado em série com a carga e conduzindo a corrente do circuito primário (I_p). Essa corrente gera um fluxo magnético alternado no núcleo ferromagnético, que induz uma corrente secundária (I_s) no enrolamento secundário (N_s). A relação entre essas correntes obedece aproximadamente à razão inversa entre o número de espiras.

Segundo a norma ANSI/IEEE C57.13, o transformador de corrente deve assegurar que a corrente secundária seja proporcional à primária, dentro dos limites de erro estabelecidos para classes de exatidão de medição e proteção.

Figura 3 - Esquema de ligação do TC.



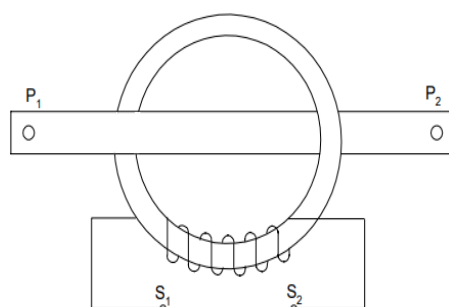
Fonte: KINDERMANN, 2012, p.02

2.3.1 TC tipo Barra

A designação “TC do tipo barra” deriva de sua característica estrutural, em que o enrolamento primário do transformador é constituído por uma barra condutora, enquanto no secundário há um condutor enrolado. Essa nomenclatura está relacionada à configuração do primário. A Figura 4 apresenta a representação do TC, em que P1 e P2 correspondem aos terminais do enrolamento primário, e S1 e S2 aos terminais do secundário.

Os transformadores de corrente de barra em baixa tensão são extensivamente empregados em painéis de comando de corrente elevada, tanto para uso em proteção quanto para medição. Esse modelo de transformador é o mais utilizado em subestações de potência de média e alta tensão. (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013, p. 94)

Figura 4 - Construção do TC tipo barra.



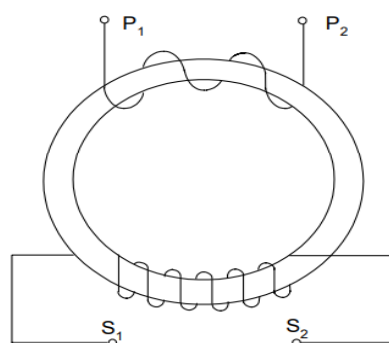
Fonte: ALMEIDA, 2006, p.18

2.3.2 TC tipo Enrolado

Conforme Mamede Filho e Mamede (2013, p. 93), “É aquele cujo enrolamento primário é constituído de uma ou mais espiras envolvendo o núcleo do transformador”.

O TC tipo enrolado consiste em um enrolamento de fio condutor ao redor do núcleo magnético, conforme ilustrado na Figura 5. Esse enrolamento é conectado ao circuito elétrico do qual se deseja medir a corrente. A relação entre a corrente no enrolamento e a corrente no circuito primário é determinada pelo número de espiras no enrolamento.

Figura 5 - Representação do TC tipo enrolado.



Fonte: ALMEIDA, 2006, p.18

Esse tipo de TC é utilizado em sistemas de medição e proteção, onde é necessário ajustar a relação de transformação. Também é aplicado em painéis elétricos para medição, onde

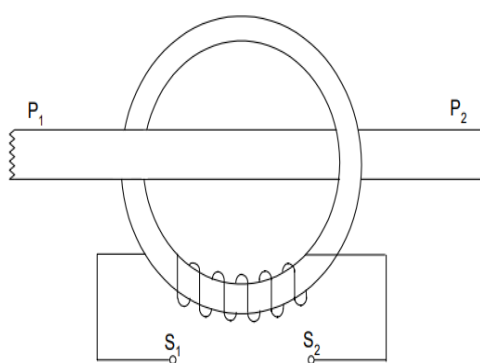
se exige boa exatidão, e é indicado para circuitos de baixa corrente, nos quais outros tipos de transformadores de corrente podem não apresentar desempenho adequado.

2.3.3 TC tipo Janela

“É aquele que não possui um primário fixo no transformador e é constituído de uma abertura através do núcleo, por onde passa o condutor que forma o circuito primário”. (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013, p. 94).

Esse tipo de transformador possui um design diferente dos demais, ele permite a instalação do dispositivo ao redor do condutor ou cabo de energia, sem a necessidade de desconectar o circuito para fazer a medição. A parte superior do transformador é aberta como uma "janela", através da qual o condutor passa, sendo a característica marcante que nomeia esse tipo de TC. Na Figura 6 é mostrado um transformador de corrente do tipo janela, sua construção peculiar é composta apenas pelo secundário, devido ao circuito primário ser o condutor que passa diretamente pelo meio do transformador, neste caso apenas uma espira constitui o enrolamento primário do TC.

Figura 6 - Representação do TC tipo janela.



Fonte: ALMEIDA, 2006, p.19.

São comumente utilizados em sistemas de medição de corrente elétrica em instalações industriais, onde é necessário monitorar a corrente sem interromper o circuito, como gavetas elétricas e centro de controle de motores. Também é muito utilizado pelas

concessionárias para o sistema de medição pela facilidade de sua instalação, devido à sua construção.

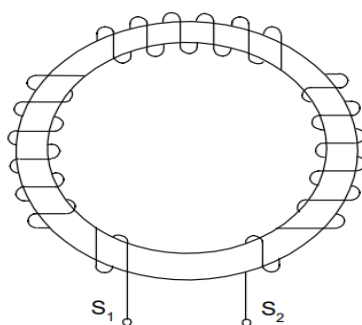
2.3.4 TC tipo Bucha

De acordo com Mamede Filho e Mamede:

Este tipo de Transformador de Corrente se assemelha muito com o TC tipo Barra, sendo sua principal característica o fato de ser instalado sobre as buchas dos equipamentos em que será realizado medição de corrente. Eles são muito usados em transformadores de força e em instalações de baixa tensão para diferencial de neutro.

O TC tipo bucha é projetado para ser inserido diretamente em um orifício (bucha) de um equipamento elétrico, como um transformador ou disjuntor. Ele é conectado ao circuito principal por meio da bucha do equipamento, permitindo a medição rápida da corrente sem interromper o fluxo de energia. A Figura 7 demonstra o aspecto construtivo desse tipo de TC.

Figura 7 - Representação do TC tipo bucha.



Fonte: ALMEIDA, 2006, p.19

Esses transformadores são frequentemente usados em equipamentos de alta tensão, como transformadores de potência e disjuntores, onde é necessário medir a corrente sem

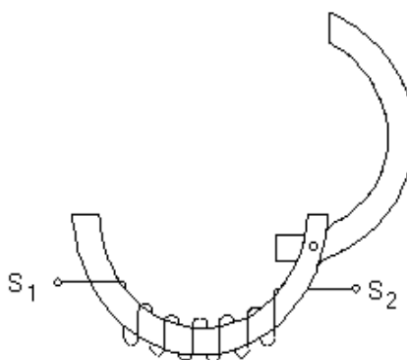
desconectar os cabos, como em subestações elétricas.

2.3.5 TC Tipo Núcleo Dividido

Este TC tem uma característica que o separa dos demais, embora seja muito parecido com o TC do tipo janela, ele permite separar seu núcleo, facilitando o encaixe do condutor que funcionará como enrolamento primário, esta técnica é muito utilizada em alicates amperímetros.

Como demonstra a Figura 8, o TC de núcleo dividido consiste em duas partes magnéticas que podem ser separadas e instaladas ao redor do condutor, sem a necessidade de interromper o circuito. Após a instalação, as duas partes são unidas para formar o núcleo completo. Sua aplicação é semelhante à do TC tipo janela, é frequentemente usado para medições de corrente em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Figura 8 - Representação do TC tipo núcleo dividido.



Fonte: ALMEIDA, 2006, p.20

2.4 Características elétricas

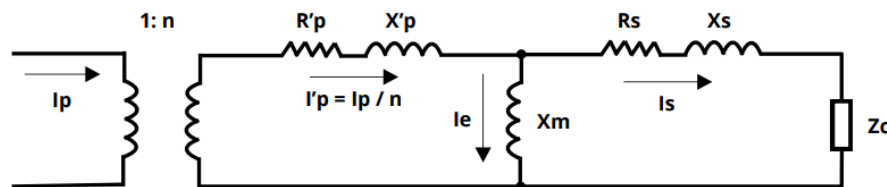
Para o correto dimensionamento dos transformadores de corrente, é fundamental compreender suas características elétricas. A análise dessas características permite avaliar como o equipamento se comporta frente às condições do sistema, garantindo sua adequada aplicação

tanto em medições quanto em sistemas de proteção.

2.4.1 Circuito Equivalente

Segundo Cláudio Mardegan o circuito equivalente do TC pode ser representado pela Figura 9.

Figura 9 - Circuito equivalente.



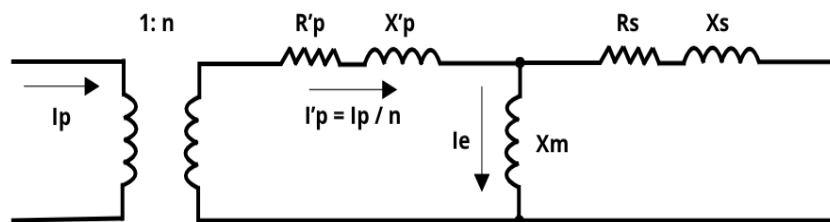
Fonte: Adaptado de: MARDEGAN, 2012, p.156

Com base no circuito equivalente representado pela Figura 9, em termos gerais, as resistências e reatâncias primárias referidas no enrolamento secundário são denominadas R'_p e X'_p , enquanto as resistências e reatâncias secundárias são designadas por R_s e X_s . O componente magnetizante é caracterizado por X_m , responsável pela corrente reativa devido à circulação das linhas de fluxo no circuito magnético. Portanto, entende-se que o funcionamento de um “TC” se dá devido a absorção de corrente I_p da rede por uma carga, circulando no enrolamento primário do TC, cuja impedância ($Z_p = R_p + jX_p$) pode ser desconsiderada. A corrente que circula no secundário do TC, I_s provoca uma queda de tensão na sua impedância interna ($Z_s = R_s + jX_s$) e na impedância da carga conectada ($Z_c = R_c + jX_c$) que afeta o fluxo principal, exigindo uma corrente magnetizante I_e diretamente proporcional. Esta corrente secundária I_s somada com a corrente magnetizante I_e será igual à corrente do enrolamento primário dividida pela relação de transformação RTC, ou seja: $I_p = (I_e + I_s)RTC$.

Observando o circuito equivalente do transformador de corrente, apresentado na Figura 10, verifica-se que, ao se abrir o secundário, a corrente que normalmente fluiria pela carga passa a circular pelo ramo magnetizante, o qual possui elevada impedância. Ao percorrer

esse caminho, a corrente de excitação torna-se elevada, resultando no aparecimento de uma sobretensão no secundário, que pode atingir valores na ordem de quilovolts. Essa condição representa risco à integridade dos equipamentos e à segurança das pessoas que eventualmente estejam em contato com o circuito, além da possibilidade de danos ao transformador, inclusive com risco de explosão caso permaneça nessa condição por tempo prolongado (MARDEGAN, 2012).

Figura 10 - Representação do secundário do TC com circuito aberto



Fonte: Adaptado de: MARDEGAN, 2012, p.159

2.4.2 Relação de transformação

A relação de transformação de um transformador de corrente é a relação entre o número de espiras no enrolamento secundário com o número de espiras no enrolamento primário, podendo ser encontrada através da seguinte fórmula:

$$RTC = \frac{N_s}{N_p} \quad (2)$$

O propósito principal de um TC é reduzir as correntes de alta magnitude no lado do primário para níveis mais seguros e mensuráveis no enrolamento secundário, conforme estabelecido na NBR 6856: Transformador de corrente (BRASIL, 2021). Portanto, a relação de transformação é projetada para alcançar essa redução na escala da corrente. Por exemplo, um TC com relação de transformação de 60:5 reduz a corrente medida no secundário para 1/12 da corrente de entrada. Esse método é útil em sistemas e malhas elétricas para permitir medição precisa de correntes elevadas e auxiliar dispositivos de proteção. É válido destacar também que

a relação de transformação para as correntes será inversamente proporcional, ou seja:

$$RTC = \frac{I_p}{I_s} \quad (3)$$

Onde **RTC** é a relação de transformação, **I_s** é a corrente do enrolamento secundário e **I_p** é a corrente do enrolamento primário.

2.4.3 Corrente nominal

De acordo com a literatura técnica e conforme os princípios gerais da ABNT NBR 6856, a corrente nominal em transformadores de corrente é uma especificação crucial que define a capacidade desses dispositivos de medição. Refere-se à corrente máxima que o TC pode suportar de maneira contínua sem comprometer sua precisão e integridade operacional. A corrente nominal é geralmente designada para garantir que o transformador possa lidar com as condições normais de carga do sistema elétrico ao qual está conectado.

As correntes nominais de TC's podem variar dependendo da aplicação e dos requisitos específicos do sistema. Algumas correntes nominais comuns para TC's incluem:

Tabela 1 – Correntes primárias e relações nominais.

Corrente primária (A)	Relação nominal (5A)	Corrente primária (A)	Relação nominal (5A)
5	1:1	100	20:1
10	2:1	150	30:1
15	3:1	200	40:1
20	4:1	250	50:1
25	5:1	300	60:1
30	6:1	400	80:1
35	7:1	500	100:1
40	8:1	600	120:1
45	9:1	1000	200:1
50	10:1	1200	240:1

Fonte: ABNT NBR 6856, 2021, p. 20

A Tabela 1 mostra alguns valores comuns de correntes primárias nominais e suas respectivas relações. É importante observar que a escolha da corrente nominal deve ser feita considerando a faixa de corrente que o TC será capaz de medir com precisão e garantir a segurança e o desempenho adequado do sistema elétrico. As normas e regulamentações locais geralmente orientam a escolha da corrente nominal para garantir a conformidade e a confiabilidade dos equipamentos.

Além de 5A e 1A, correntes secundárias nominais específicas podem ser projetadas para atender requisitos particulares de sistemas onde a carga do TC precisa ser baixa, pois correntes menores diminuem a potência no secundário.

2.4.4 Carga Nominal

De acordo com literatura técnica e conforme os princípios gerais da ABNT NBR 6856, a carga nominal pode ser entendida como à carga máxima em (VA) que o transformador pode suportar no enrolamento secundário, mantendo sua precisão e segurança operacional. Ela pode ser obtida através do somatório de todas as cargas ligadas ao secundário, assim como a carga interna do TC, a carga contida nos cabos e as cargas dos equipamentos conectados, conforme equação a seguir:

$$S_{TCnom} = S_{int} + S_{cabos} + S_{secund} \quad (4)$$

Onde S_{TCnom} é a carga nominal do TC em VA, S_{int} é a carga interna do TC, S_{cabos} é a carga contida nos cabos e S_{secund} é a carga dos equipamentos conectados no secundário.

A carga contida nos cabos pode ser encontrada pelo produto da impedância do condutor com o comprimento total dos fios e com o quadrado da corrente nominal no secundário, conforme equação a seguir:

$$S_{cabos} = Z_{cabos} \times L_c \times I_s^2 \quad (5)$$

Onde Z_{cabos} é a impedância dos condutores, L_c é o comprimento total dos condutores e I_s é a corrente nominal do enrolamento secundário.

Segundo a NBR 6856 a carga nominal é a impedância total ligada aos terminais secundários do TC, podendo ser obtida através da divisão entre a potência nominal no secundário e o quadrado da corrente no secundário, conforme a seguinte equação:

$$Z_{TCnom} = \frac{S_{TCnom}}{I_s^2} \quad (6)$$

Onde Z_{TCnom} é a impedância nominal do TC.

Durante o dimensionamento de um TC é fundamental calcular corretamente a carga nominal (ou *burden*), pois ela representa a soma das impedâncias conectadas ao secundário, incluindo instrumentos de medição, relés de proteção e a resistência dos cabos. Esse valor influencia diretamente o desempenho do TC, uma vez que cargas elevadas exigem maior tensão no secundário para manter a corrente proporcional.

2.4.5 Fator de sobrecorrente

O fator de sobrecorrente (Fs) de um TC é um número que indica a capacidade do TC de suportar correntes acima da sua corrente nominal sem saturar e manter a sua classe de exatidão. Em outras palavras, o Fs representa a relação entre a corrente máxima que o TC pode suportar e a sua corrente nominal.

O fator de sobrecorrente (Fs) do TC é definido pela relação da máxima corrente simétrica de curto-circuito que pode passar pelo primário do TC e a sua corrente primária nominal, para que a precisão de sua classe de exatidão seja mantida. (KINDERMANN, 2012, p. 12)

Segundo Mamede Filho e Mamede (2013), o fator de sobrecorrente é alterado,

sendo inversamente proporcional à referida carga. Consequentemente, a proteção natural que o TC oferece ao aparelho fica prejudicada. Fornecendo o valor que assume o fator de sobrecorrente, em função da relação entre a carga nominal do TC e a carga ligada ao seu secundário, conforme a equação abaixo:

$$F_1 = \frac{C_n}{C_s} \times F_s \quad (7)$$

Onde F_1 é a carga corrigida ligada ao secundário, C_n é a carga nominal, C_s é a carga ligada ao secundário e F_s é o fator de sobrecorrente nominal.

O F_s também pode ser obtido através da relação da máxima corrente de curto circuito simétrica no enrolamento primário do TC pela corrente primária nominal, assim será mantida a precisão da sua classe de exatidão. Conforme equação a seguir:

$$F_s = \frac{I_{pmax}}{I_{pnom}} \quad (8)$$

Onde I_{pmax} é a máxima corrente de curto-circuito simétrica e I_{pnom} é a corrente primária nominal do TC.

2.4.6 Erros de relação de transformação

Erros de relação de transformação são discrepâncias ou desvios que ocorrem na relação entre as grandezas elétricas em um transformador ideal e as grandezas reais medidas em um transformador real. Um transformador é um dispositivo eletromagnético que opera com base no princípio da indução eletromagnética para transferir energia entre circuitos, geralmente de um circuito para outro, alterando a tensão e a corrente elétrica.

Os erros nos transformadores de corrente são devidos basicamente à corrente do ramo magnetizante. A impedância do enrolamento primário não exerce nenhum efeito sobre o erro do TC, representado apenas por uma impedância série no circuito do sistema em que está instalado este equipamento, cujo valor pode ser considerado desprezível. (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013, p. 122).

De acordo com Mamede, o erro de relação de transformação pode ser corrigido pelo fator de correção de relação relativo FCR_r e dado na Equação abaixo:

$$FCR_r = \frac{I_s + I_e}{I_s} \quad (9)$$

Onde FCR_r é o fator de correção de relação relativo, I_s é a corrente do enrolamento secundário e I_e é a corrente no ramo de magnetização do TC.

O fator de correção de relação (FCR) ajusta a relação de transformação de corrente nominal (RTC), fornecendo a relação de transformação real do transformador de corrente (TC). Em outras palavras, o FCR corrige a RTC para eliminar erros de medição. Esse fator pode ser aplicado nos sistemas de medição e proteção, por meio de ajustes nos equipamentos instalados no secundário.

$$FCR_r = \frac{RTC_r}{RTC} \quad (10)$$

Onde RTC_r é a relação de transformação de corrente real e RTC é a relação de transformação de corrente nominal.

2.4.7 Erros de ângulo de fase

A defasagem do ângulo de fase em transformadores de corrente está diretamente

associada à corrente de excitação necessária para magnetizar o núcleo ferromagnético do equipamento. Em condições ideais, a corrente secundária deveria ser exatamente proporcional e defasada de 180° em relação à corrente primária; contudo, na prática, parte da corrente primária é consumida no processo de magnetização, não sendo transferida ao secundário. Essa corrente de excitação possui componentes que não estão em fase com a corrente principal, provocando um desvio angular entre as correntes primária e secundária.

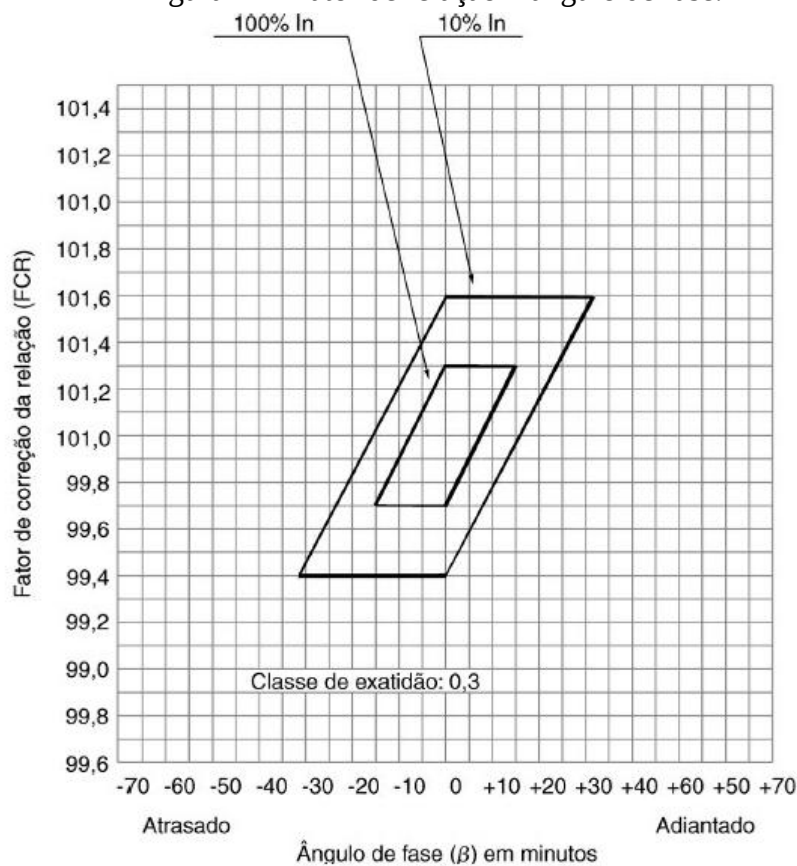
O ângulo β que mede a defasagem entre a corrente vetorial primária e o inverso da corrente vetorial secundária de um transformador de corrente. Segundo a ABNT para qualquer fator de correção da relação (FCR) conhecido de um TC, os valores-limite positivo e negativo do ângulo de fase (β), em minutos, são expressos pela Equação 11, onde o fator de correção de transformação (FCT) deste TC assume os seus valores máximo e mínimo.

$$\beta = 2600 \times (FCR - FCT) \quad (11)$$

Onde β é o ângulo de fase, **FCR** é o fator de correção de relação e **FCT** é o fator de correção de transformação.

A relação entre o ângulo de fase β e o fator de correção de relação é obtida do gráfico da Figura 11, extraído da NBR 6856 – Transformadores de corrente – Especificação para o TC classe 0,3. É através dessa equação que são elaborados os gráficos de exatidão para as diferentes classes de exatidão, ou seja, 0,3, 0,6 e 1,2, fazendo variar os valores de FCR e fixando os quatro valores de FCT para cada classe de exatidão considerada. (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013, p. 124).

Figura 11 - Fator de relação x ângulo de fase.



Fonte: MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013, p. 123

2.4.8 Classe de Exatidão

A classe de exatidão é uma especificação que define a precisão com que os TC's medem uma corrente elétrica. Ela pode ser definida pelas normas ABNT e ANSI, cada uma com seus critérios e limites de operação determinados.

De acordo com (KINDERMANN, 2012), a ABNT define a máxima potência aparente (VA) de carga que pode ser ligada ao secundário do TC em regime permanente de forma que, durante o máximo curto-circuito limitado pelo fator de sobrecarga, seu erro não ultrapasse o da classe de exatidão. A Tabela 2 mostra possíveis combinações da classe de exatidão de TC's.

Tabela 2 – Possíveis combinações da classe de exatidão de acordo com a ABNT 1992.

1º Termo	2º Termo	3º Termo	4º Termo	5º Termo	6º Termo
A ou B	2,5 5 10	F	5 10 15 20	C	2,5
					5
					12,5
					22,5
					25
					45
					50
					90
					100
					200

Fonte: KINDERMANN, 2012, p.20

O primeiro termo indica a classificação do TC, sendo “A” para alta e “B” para baixa reatância, o segundo termo indica a classificação em relação ao erro admissível de sua classe em porcentagem, o terceiro termo, letra “F” refere-se ao fator de sobrecorrente, enquanto o quarto termo é o multiplicador da corrente nominal no secundário, o quinto termo, letra “C” refere-se à carga no secundário do TC e por fim o último número indica o valor em VA da potência aparente em seu secundário.

De acordo com a ANSI/IEEE C57.13, a classe de exatidão é determinada pelo limite da máxima tensão no secundário do TC em condição da máxima corrente de curto-circuito, de acordo com seu fator de sobrecorrente. A Tabela 3 mostra possíveis combinações da classe de exatidão.

Tabela 3 - Possíveis combinações da classe de exatidão da norma ANSI.

1º Termo	2º Termo	3º Termo
2,5 5 10	B ou A	10
		20
		50
		100
		200
		800

Fonte: KINDERMANN, 2012, p.16

O primeiro termo indica o erro admissível da classe de exatidão em porcentagem, o segundo termo mostra se o TC é de baixa ou alta reatância, sendo “B” – low e “A” – high, respectivamente. Por fim, o terceiro termo indica a máxima tensão no secundário do TC.

A norma ANSI/IEEE C57.13 utiliza duas principais letras para classificar os TCs quanto à precisão em função da carga e da tensão desenvolvida em regime de falha:

Classe L (*Low accuracy burden*): São utilizados em sistemas com menor exigência de carga no secundário, sendo normalmente aplicados em circuitos de medição, especialmente com equipamentos eletrônicos modernos que consomem pouca energia. No Brasil, essa classificação corresponde à Classe B, equivalente à Classe L da nomenclatura ANSI.

Classe H (*High accuracy burden*): São projetados para operar com cargas mais elevadas e podem desenvolver tensões mais altas no secundário sob condições de sobrecorrente. Esses transformadores de corrente são ideais para aplicações de proteção, nas quais a exatidão durante correntes de curto-circuito é essencial e onde os relés exigem maior energia (VA) para funcionar corretamente. No Brasil, essa característica corresponde à Classe A, equivalente à Classe H da nomenclatura ANSI.

Apesar da diferença na nomenclatura, o princípio por trás da classificação é o mesmo, garantir que o transformador de corrente seja adequado à sua função, seja ela medição com alta precisão em condições normais (classe L/B), ou proteção confiável sob condições extremas de corrente (classe H/A).

Segundo o item 8.3 da norma ABNT NBR 6856:2021 duas diferentes abordagens são utilizadas para especificar transformadores de corrente de proteção. Na prática, cada uma das duas abordagens pode resultar na mesma realização física. A tabela abaixo mostra a caracterização de cada termo que compõe o TC, conforme a ABNT NBR 6856:2021.

Tabela 4 - Possíveis combinações da classe de exatidão da norma ABNT 2021

1º Termo	2º Termo	3º Termo	4º Termo
2,5	5 10	P PR PX PXR	
5			
12,5			5
22,5			10
25			15
45			20
50			30
90			
100			
200			

Fonte: ABNT NBR 6856, 2021.

O primeiro termo indica a carga máxima em VA do TC, o segundo termo indica a

classe de exatidão em porcentagem, o terceiro termo especifica a classe de proteção do TC, conforme os itens abaixo:

As classes P e PR são para especificar um transformador de corrente que cumpre com os requisitos de uma corrente de curto-circuito simétrica (mais comum). Já as classes PX e PXR para especificar um transformador de corrente pela determinação de suas características de magnetização. Para distinguir entre as classes P e PR ou entre as classes PX e PXR, utilizar o critério de fluxo remanescente.

O fluxo residual, também denominado fluxo remanescente, refere-se à densidade de fluxo magnético que permanece no material mesmo quando a força magnetomotriz é nula. Nessa condição, o material continua magnetizado de forma simétrica e cíclica, caracterizando a remanescência, que ocorre quando ainda há densidade de fluxo em um circuito mesmo após a retirada da força magnetomotriz (MARDEGAN, 2012).

A reatância de dispersão é a parcela do fluxo magnético que não se acopla entre os enrolamentos do transformador, comportando-se como uma oposição adicional à transferência de energia. Dessa forma, valores reduzidos dessa reatância proporcionam maior precisão na reprodução da corrente no enrolamento secundário.

Classe P – Transformador de corrente para serviços de proteção sem limite para o fluxo remanescente, para o qual o comportamento de saturação no caso de um curto-circuito simétrico é especificado. ABNT NBR 6856:2021 p11.

Classe PR – Transformador de corrente para serviços de proteção com limite para o fluxo remanescente, para o qual o comportamento de saturação no caso de um curto-circuito simétrico é especificado. ABNT NBR 6856:2021 p11.

Classe PX – Transformador de corrente de baixa reatância de dispersão para serviços de proteção, sem limite de fluxo remanescente, para o qual o conhecimento da característica de excitação, da resistência do enrolamento secundário e da relação de espiras é suficiente para avaliar o seu desempenho em relação ao sistema de proteção com o qual é usado. ABNT NBR 6856:2021 p12.

Classe PXR – Transformador de corrente para serviços de proteção com limite de fluxo remanescente, para o qual o conhecimento da característica de excitação, da resistência secundária, da resistência da carga secundária e da relação de espiras é suficiente para avaliar o seu desempenho em relação ao sistema de proteção com o qual é usado. ABNT NBR 6856:2021 p12.

Por fim, o quarto termo é o fator de sobrecorrente.

2.4.9 Tensão Secundária

Outro elemento fundamental na hora de dimensionar o TC é a tensão secundária, ela é projetada para ser proporcional à corrente primária e é diretamente influenciada pela carga conectada ao secundário. É fundamental garantir que a carga conectada ao TC seja apropriada para evitar distorções na medição. Além disso, o isolamento adequado e a segurança elétrica do circuito secundário são aspectos críticos, considerados nas especificações de projeto dos TC's.

A tensão secundária pode ser obtida através do resultado do produto da impedância pela corrente nominal no secundário e pelo fator de sobrecorrente, conforme a equação a seguir:

$$V_{m\acute{a}x} = Z_{TC} \times I_S \times F_S \quad (12)$$

Onde $V_{m\acute{a}x}$ é a máxima tensão no secundário, Z_{TC} é a impedância interna do TC, I_S é a corrente do enrolamento secundário e F_S é o fator de sobrecorrente nominal.

A tensão nos terminais secundários dos transformadores de corrente encontra-se limitada, principalmente, pela saturação do núcleo magnético. No entanto, tensões secundárias elevadas podem ocorrer quando o enrolamento primário é submetido a correntes elevadas ou quando a impedância da carga conectada ao secundário é superior à carga nominal do TC.

A impedância de carga elevada refere-se à oposição resistiva e reativa apresentada pelos dispositivos conectados ao secundário, como relés e cabos. A componente resistiva está associada às perdas ôhmicas dos condutores e equipamentos, enquanto a componente reativa está relacionada aos efeitos de indutância e capacitância do circuito, que provocam defasagem entre tensão e corrente. Dessa forma, quanto maior a impedância da carga, maior será a tensão necessária no secundário para manter a circulação da corrente.

2.4.10 Tensão no Ponto de Joelho (Knee-point)

A tensão no ponto de joelho, também conhecida como "*knee-point voltage*" em inglês, refere-se à tensão no qual um transformador de corrente (TC) começa a saturar

(HARGRAVE et al., 2018). Em um TC, a saturação ocorre quando o núcleo magnético do transformador atinge um estado onde um aumento adicional na corrente primária não resulta em uma proporção correspondente de aumento na corrente secundária.

A capacidade de um transformador de corrente operar sem saturação é crucial para garantir uma medição precisa das correntes elétricas. Se um TC estiver saturado, a relação entre a corrente primária e a corrente secundária não será mais linear, o que pode levar a erros significativos nas medições. Ao projetar ou operar um transformador de corrente, é importante considerar o ponto de joelho e garantir que o TC seja utilizado em uma faixa em que a saturação seja evitada ou minimizada para manter a precisão nas medições.

2.4.11 Fator Térmico Nominal

Conforme definido na NBR 6856: Transformador de corrente (BRASIL, 2021), o fator térmico nominal refere-se à capacidade do transformador de corrente de suportar correntes de forma contínua ao longo do tempo, sem ultrapassar seus limites térmicos seguros. Esse fator está intrinsecamente ligado à capacidade do TC de dissipar o calor gerado durante a operação normal.

Quando uma corrente elétrica flui através de um TC, ocorrem inevitáveis perdas por efeito Joule devido à resistência do material condutor. Essas perdas se traduzem em calor, e a habilidade do transformador de corrente em lidar com essa dissipação térmica é vital para sua operação confiável. O fator térmico nominal é expresso como a relação entre a corrente térmica nominal e a corrente nominal. Sendo a corrente térmica nominal, o valor eficaz da corrente primária de circuito-circuito simétrico que o TC pode suportar em um tempo geralmente igual a 1 segundo.

Contudo, o fator térmico pode ser considerado como um indicador da robustez do TC em condições de operação. Um fator térmico adequado assegura a confiabilidade do transformador de corrente, garantindo que ele possa lidar com a carga contínua sem riscos de superaquecimento, o que poderia comprometer sua disponibilidade.

2.4.12 Corrente dinâmica nominal

Segundo a NBR 6856: Transformador de corrente (BRASIL,2021), a corrente dinâmica nominal é cerca de 2,5 vezes a corrente térmica nominal, estando com seu enrolamento secundário em curto-circuito, levando em consideração os limites de elevação de temperatura especificados pela norma, em outras palavras, a corrente térmica nominal é a corrente máxima que o transformador pode suportar continuamente sem ultrapassar sua capacidade de dissipação de calor. Portanto, a corrente dinâmica nominal refere-se à corrente máxima instantânea que um TC pode suportar sem causar saturação em seu núcleo magnético. Quando uma corrente muito elevada passa pelo TC, pode ocorrer a saturação do núcleo magnético. A saturação ocorre quando o núcleo atinge um ponto em que não pode mais aumentar a magnetização proporcionalmente ao aumento da corrente, resultando em uma medição distorcida e imprecisa. Isso é especialmente crítico durante eventos de curto-circuito ou outras condições de falha em um sistema elétrico.

Portanto, a corrente dinâmica nominal é uma especificação importante para os TC's, indicando a capacidade do transformador de suportar correntes de curta duração sem saturar o núcleo e comprometer a precisão das medições. Essa especificação é crucial para garantir o desempenho confiável do TC em situações de sobrecarga temporária.

3 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a metodologia adotada neste trabalho, descrevendo de forma estruturada as etapas necessárias para o desenvolvimento e aplicação do estudo. Inicialmente, aborda-se o dimensionamento do transformador de corrente, apresentando os fundamentos e procedimentos utilizados. Em seguida, detalha-se o desenvolvimento do software, cuja construção é explicada por meio da descrição de suas telas principais (Primeira, Segunda, Terceira e Quarta), do processo de desbloqueio dos macros e das orientações gerais de uso. Posteriormente, a metodologia inclui dois estudos de caso, aplicando o software e os critérios de dimensionamento em situações práticas. Por fim, na seção de resultados, são apresentadas as simulações correspondentes aos dois estudos de caso, permitindo a análise comparativa e a verificação do desempenho da ferramenta desenvolvida.

3.1 Dimensionamento do TC

O procedimento de dimensionamento inicia-se com o levantamento das informações elétricas do sistema onde o TC será instalado. É necessário conhecer a potência nominal e a potência contratada do transformador de força associado, bem como as tensões primária e secundária, a impedância percentual e as correntes nominais e de curto-circuito em ambos os lados. Esses parâmetros são essenciais para determinar as condições de operação e o regime de corrente que o TC deverá suportar.

Com os dados em mãos, calcula-se a corrente nominal do primário do TC, que corresponde à corrente máxima que o transformador de corrente deve medir corretamente sem saturação. Essa corrente é obtida a partir da corrente de curto-circuito no secundário do transformador principal, ajustada por fatores de temperatura e sobrecorrente.

Após determinar a corrente nominal primária, define-se a relação de transformação do TC, que expressa a proporção entre a corrente no primário e a corrente no secundário. Em geral, o secundário do TC é padronizado para 1 A ou 5 A, e a relação é escolhida de modo que a corrente primária nominal seja próxima à corrente real de operação do sistema.

Em seguida, realiza-se o cálculo da carga total conectada ao secundário do TC, também chamada de *burden*. Essa carga inclui a soma das potências dos equipamentos conectados (como relés, medidores e instrumentos de medição), além da impedância interna do TC e da impedância dos condutores que interligam os equipamentos. O somatório dessas cargas deve ser expresso em volt-ampères (VA).

A impedância dos cabos é obtida por meio do catálogo do fornecedor ou de valores padronizados em livros didáticos, conforme a Tabela 6. Essa impedância, quando multiplicada pela corrente secundária, fornece a queda de tensão nos condutores. A carga total no circuito secundário é obtida somando a carga interna do TC, a carga dos condutores e a carga dos equipamentos de medição e proteção.

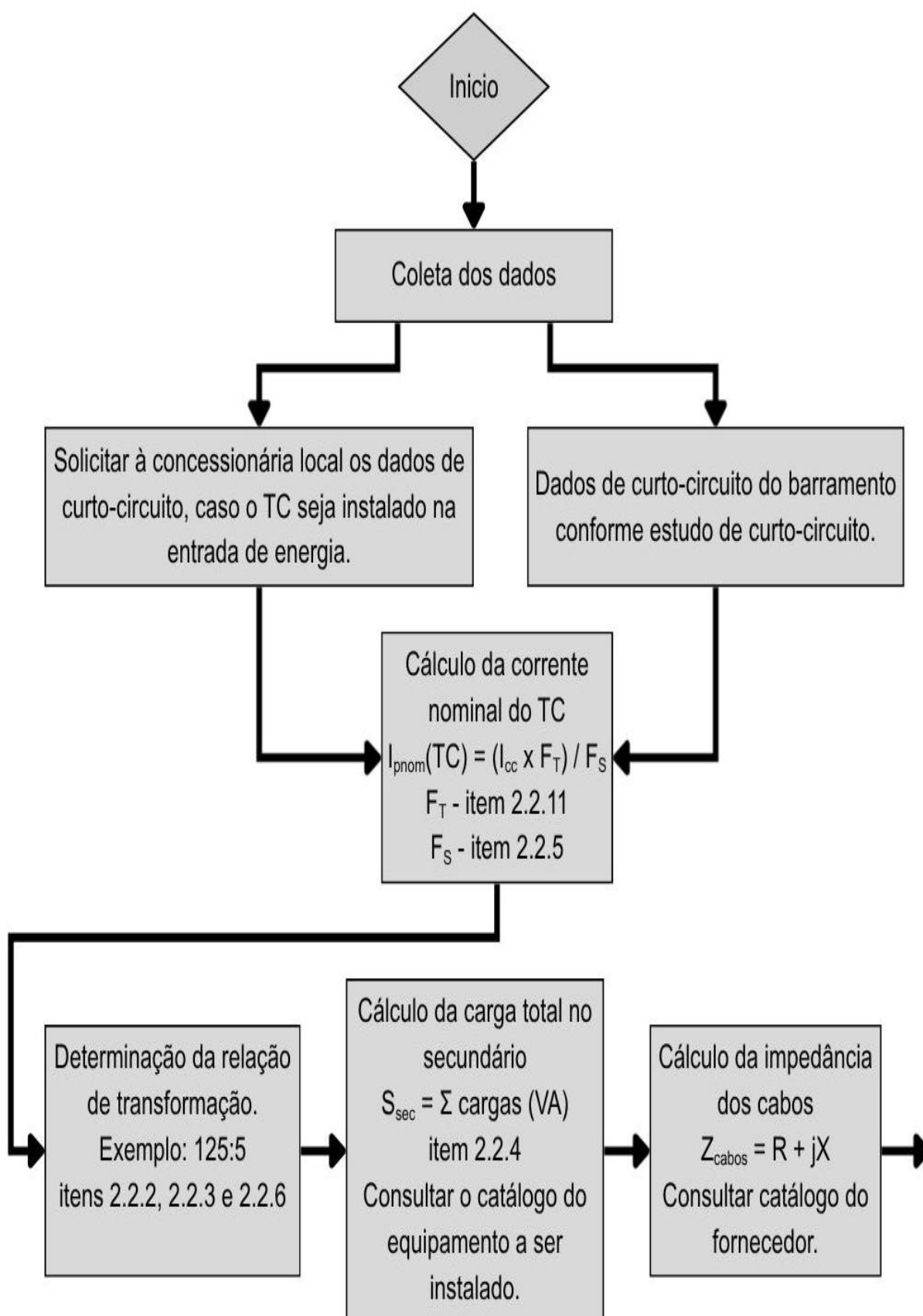
Com base na carga total, determina-se a impedância equivalente do secundário, ou seja, a Z_{burden} . Essa impedância é um parâmetro essencial para verificar se o TC poderá operar sem ultrapassar seu limite de erro de exatidão.

A partir do valor de Z_{burden} e considerando o tipo de aplicação (medição ou proteção), seleciona-se a classe de exatidão adequada. As classes de exatidão são padronizadas pelas normas ABNT e ANSI, e cada uma define a precisão e o comportamento do TC sob diferentes níveis de corrente.

Por fim, é importante verificar a tensão máxima induzida no secundário durante o curto-circuito.

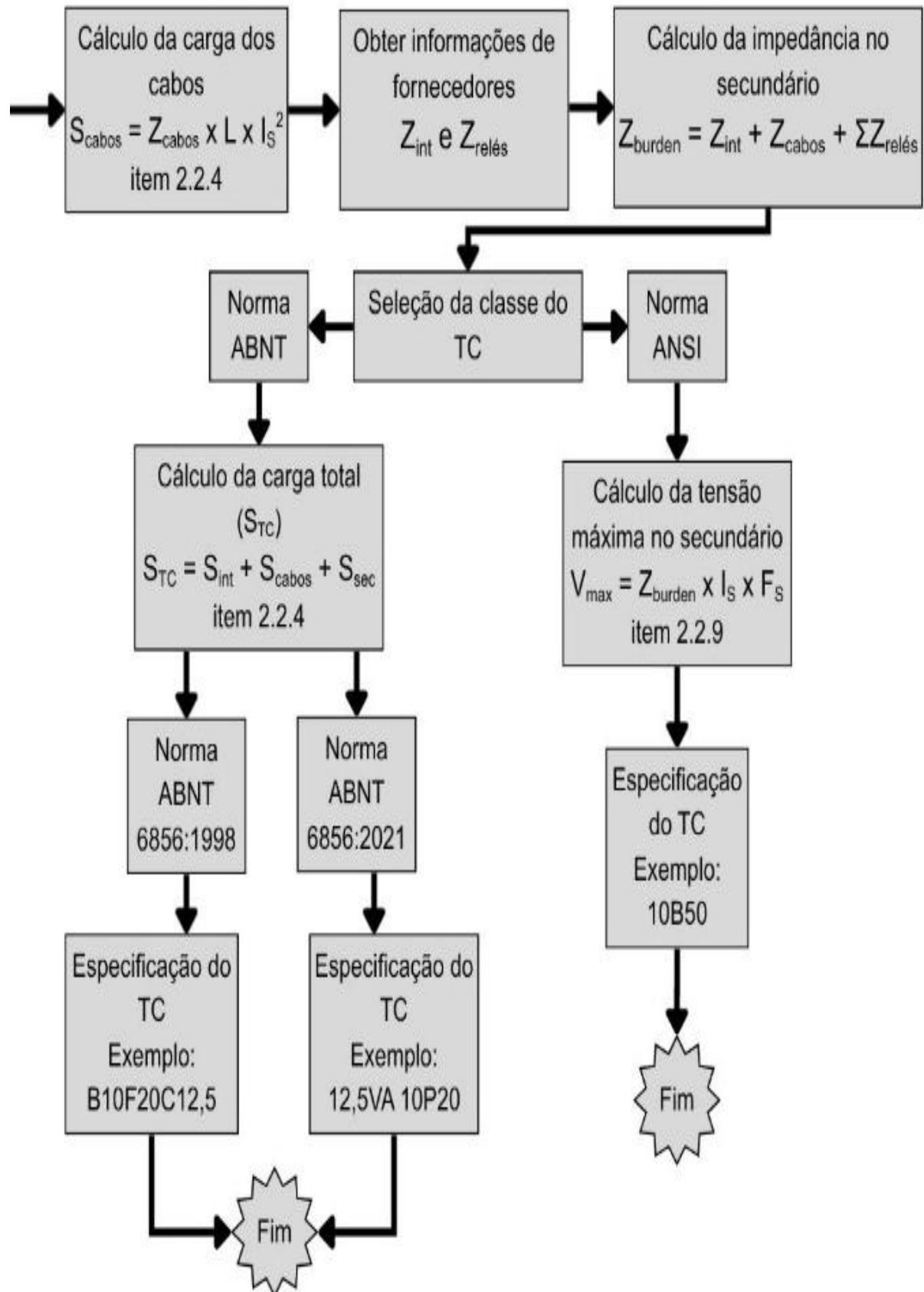
Em resumo, o dimensionamento de um transformador de corrente envolve a determinação dos parâmetros elétricos do sistema, o cálculo das correntes nominais e de curto-circuito, a verificação das cargas secundárias e a escolha adequada da classe e relação de transformação. O fluxograma a seguir mostra todas as etapas necessárias para o dimensionamento do TC.

Figura 12 - Fluxograma parte 1.



Fonte: Autores

Figura 13 - Fluxograma parte 2.



3.2 Desenvolvimento do software

O software foi desenvolvido utilizando a ferramenta Visual Basic for Applications (VBA), em conjunto com o Microsoft Excel, com o objetivo de auxiliar na seleção de um transformador de corrente (TC) adequado ao projeto. Ao final do processo, o sistema gera uma folha de dados que pode ser encaminhada ao setor de compras ou enviada diretamente ao fornecedor, contendo todas as informações necessárias. Portanto para o desenvolvimento do software as seguintes telas foram criadas.

3.2.1 Primeira tela

Esta interface foi elaborada com o objetivo de coletar os dados de projeto fornecidos pelo usuário. Essas informações devem ser previamente conhecidas pelo projetista antes do início do dimensionamento do transformador de corrente (TC). Conforme ilustrado na Figura 14, são solicitados dados como a demanda contratada, que pode ser obtida na fatura de energia elétrica, o fator de temperatura (F_t), dados do transformador de potência que alimenta o circuito, como potência (kW), Impedância (%), tensão na baixa (V) e tensão na média/alta (V).

Figura 14 - Tela inicial

A interface 'Dados de projeto' é uma janela com o título 'Dados de projeto' e um botão de fechar (X) no canto superior direito. O conteúdo é dividido em duas seções principais:

- Informações de projeto:**
 - Dados necessários:**
 - Demanda contratada (Dcon):** Campo de texto com unidade [kW].
 - Fator de temperatura (Ft):** Menu suspenso.
- Dados de placa do transformador de potência:**
 - Potência:** Campo de texto com unidade [kVA] e exemplo Ex.: 112,5.
 - Impedância:** Campo de texto com unidade [%] e exemplo Ex.: 3,50.
 - Tensão na baixa:** Campo de texto com unidade [V] e exemplo Ex.: 220/127 ou 380/220.
 - Tensão na alta/média:** Campo de texto com unidade [V] e exemplo Ex.: 13800.

Na parte inferior direita, há dois botões: 'Avançar' e 'Sair'.

Fonte: Autores

O código em VBA valida os dados inseridos em um formulário do Excel (UserForm) antes de transferi-los para a planilha “calculo”. Ele verifica se todos os campos obrigatórios estão preenchidos e se o valor da baixa tensão está no formato correto (por exemplo, 220/127). Caso as informações estejam corretas, os valores são convertidos e gravados em células específicas da planilha, o formulário atual é fechado e outro formulário é aberto para dar continuidade ao processo. O segundo botão tem a função de apenas fechar o formulário sem realizar nenhuma gravação de dados. Para verificar o código desta tela, ver APÊNDICE A.

3.2.2 Segunda tela

Esta tela tem como objetivo dar continuidade à coleta de dados, voltando-se especificamente para o transformador de corrente (TC) que será instalado. Os dados necessários incluem: corrente de curto-circuito (I_{cc}), corrente no secundário do TC (I_s), com valores padrão entre 5 A e 1 A, fator de sobrecorrente (F_s), cujos valores devem seguir a norma ABNT NBR 6856:2021. O valor de 20 é considerado o padrão para TCs de proteção. Cabe destacar que a concessionária CEMIG, utilizada como referência neste estudo, adota dois fatores de

sobrecorrente: o valor 50 para o critério de sobrecorrente e o valor 20 para o critério de sobrecorrente instantânea, conforme apresentado na Figura 15. Dessa forma, o software desenvolvido permite a inserção de ambos os valores, sendo o primeiro referente à sobrecorrente e o segundo à sobrecorrente instantânea. Caso o segundo parâmetro não seja utilizado, o campo pode ser deixado em branco.

Além disso, deve-se inserir a impedância interna do TC (Z_{int}), obtida junto ao fabricante, a bitola dos condutores (mm^2) e a distância dos condutores (L_{cabos}), considerando o percurso de ida e volta. Também é necessário informar se o TC é de alta ou baixa reatância, informação fornecida pelo fabricante, classe de exatidão (%), e, por fim, a classe de proteção, conforme norma.

Figura 15 - Segunda tela

Dimensioamento de Transformador de Corrente

Dimensione o Transformador de corrente

Dados necessários:

Corrente de curto-circuito (I_{cc}): [A]

Corrente no secundário do TC (I_s): [A]

Fator de sobrecorrente (FS):

Impedância interna do TC (Z_{int}): [Ohm]

Bitola dos condutores (mm^2):

Distância dos condutores (L_{cabos}): [m]

Alta ou baixa reatância:

Classe de exatidão (%):

Classe de Proteção: *Por padrão é selecionado "P".

*Para cálculo de FS diferentes (Ex. CEMIG para I_{cc} , FS de 50. E instantâneo, FS de 20.

Calcular **Voltar**

Fonte: Autores

O código tem a função de controlar as ações executadas pelos botões de comando do formulário. No primeiro botão (**Calcular**), é realizada a verificação do preenchimento dos campos obrigatórios. Caso algum campo esteja vazio, o sistema exibe uma mensagem de alerta solicitando o preenchimento antes de prosseguir. Quando todos os campos estão corretamente preenchidos, os valores inseridos são convertidos para o formato numérico e transferidos para

células específicas da planilha denominada “*calculo*”. Em seguida, são formadas duas variáveis, **ANSI** e **ABNT**, a partir da concatenação de valores provenientes de diferentes células dessa planilha. Após o término dessa etapa, o formulário é encerrado e a próxima interface é exibida, permitindo a continuidade do processo. Para verificar o código desta tela, ver APÊNDICE B.

3.2.3 Terceira tela

Nesta tela, o projetista poderá escolher entre valores padrão, selecionando apenas a primeira coluna e os equipamentos desejados. Caso seja necessário inserir o valor específico de um equipamento, selecione a segunda coluna correspondente e digite o valor desejado em VA.

Figura 16 - Terceira tela

Selecione os equipamentos ligados ao secundário		Opcional	
☐ Selecionar	Amperímetros registradores (3,5 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Amperímetros indicadores (2,5 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Wattímetros registradores (3,5 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Wattímetros indicadores (2,5 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Medidores registradores (5 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Medidores indicadores (5 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Frequencímetros registradores (3,5 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Frequencímetros registradores (2,5 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Multimedidores digitais (0,5 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Relés de sobrecorrente (6 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Relés direcionais (6,5 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Relés de distância (8 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Relés diferenciais (8 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Controlador de FP (0,5 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Medidor de kW - kWh (0,94 VA)	☐ Inserir valor	VA
☐ Selecionar	Medidor de kVArh (0,94 VA)	☐ Inserir valor	VA

Calcular Voltar

Fonte: Autores

O objetivo é realizar a transferência automática de valores para a planilha “*calculo*”, de acordo com as seleções e entradas do usuário.

Inicialmente, é declarado um vetor contendo valores pré-definidos e, em seguida, o código verifica as dezesseis primeiras caixas de seleção (CheckBox1 a CheckBox16), correspondentes a primeira coluna. Para cada item marcado, o programa insere o valor correspondente do vetor na coluna O da aba “calculado”, nas linhas de 9 a 24; caso a caixa de seleção não esteja marcada, é inserido o valor zero.

Na sequência, o código percorre as dezesseis caixas de seleção subsequentes (CheckBox17 a CheckBox32), verificando também o conteúdo das caixas de texto associadas (TextBox1 a TextBox16), que correspondem a segunda coluna. Quando a caixa de seleção está ativada, o código valida se o valor informado é numérico. Se for, o valor digitado é convertido para número e transferido para a mesma faixa da coluna O; caso contrário, é inserido zero, evitando erros de tipo de dado.

Após a conclusão do processo, o formulário “EquipamentosSEC” (Figura 16) é descarregado da memória e o formulário “ResultadoTC” (Figura 17) é exibido para continuidade da operação. Para verificar o código desta tela, ver APÊNDICE C.

3.2.4 Quarta tela

Por fim, esta tela é responsável pela exibição dos valores calculados, obtidos a partir dos dados inseridos nas etapas anteriores do sistema. Nela, o usuário pode visualizar de forma consolidada todos os resultados referentes ao dimensionamento do transformador de corrente (TC), bem como optar por gerar um relatório completo ou reiniciar o processo clicando no botão “recalcular”. Esse relatório reúne, em um único documento, todas as informações técnicas necessárias para a especificação do TC.

Figura 17 - Quarta tela

ABNT 1992	ABNT 2021	ANSI
A10F20C22,5	22,5VA 10P20	10A100

Recalcular Gerar Relatório

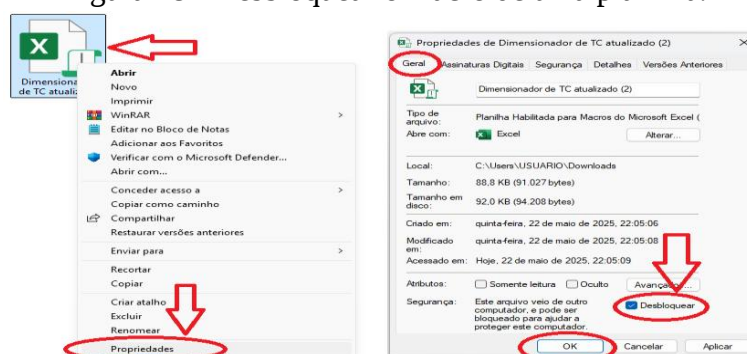
Fonte: Autores

O código tem como finalidade apresentar os valores obtidos nos cálculos realizados, além de disponibilizar dois botões de comando: um destinado à geração do relatório final e outro que permite reiniciar o processo de cálculo desde a etapa inicial. Dessa forma, o usuário pode visualizar os resultados de forma imediata e optar entre concluir o procedimento com a emissão do relatório ou realizar um novo dimensionamento. Para verificar o código desta tela, ver APÊNDICE D.

3.2.5 Desbloqueio do macro

Ao abrir o aplicativo é iniciado a macro, portanto é imprescindível que a macro seja permitida ao abrir o aplicativo. Na Figura 18, mostra como habilitar o macro do aplicativo, como a macro pode ser prejudicial ao seu dispositivo, aconselhamos que seja usada apenas a versão apresentada nesta monografia ou outra atualização elaborada pelos autores.

Figura 18 - Desbloquear o macro de uma planilha.



Fonte: Autores

3.2.6 Utilizando o software

Ao iniciar o aplicativo, o usuário será direcionado para a tela inicial, onde deve preencher com as informações de projeto que são dados essenciais para a caracterização da rede de alimentação e montagem de um coordenograma, esses dados são obtidos através de projetos elétricos ou faturas de energia, com essas informações em mãos é necessário preencher cada

campo para prosseguir para próxima tela. Quando todas as informações forem preenchidas clicar em “Avançar”.

Na Tela de dimensionamento de TC é necessário que o usuário tenha solicitado essas informações junto da concessionária, caso seja uma subestação, ou ter essas informações de projeto. A Corrente de curto-circuito (I_{cc}) deve ser utilizada do valor trifásico, visto que é o maior valor de corrente que passará pelo TC e com essa corrente que será dimensionado o transformador, pois como se trata de um TC de proteção, ele não poderá saturar diante desta corrente de curto. A Corrente no secundário (I_s) são valores comerciais, portanto será utilizado os valores de 1 A ou 5 A. O fator de sobrecorrente (FS) dependerá de qual concessionária esse TC será utilizado, por exemplo a CEMIG, o fator utilizado conforme norma ND. 5.3 item 9.1.4.2.2 de 06/09/2023, é citado que o fator de sobrecorrente é de 50, neste caso para subestação de entrada de energia que deve ser aprovado pela concessionária, já em outros casos vai de acordo do entendimento do projetista, o recomendado pela norma NBR 6856 é de 20. O valor da impedância interna do TC (Z_{int}) existem duas maneiras de se obter, caso queira verificar com o aplicativo se o TC em campo atende basta apenas verificar no datasheet ou com o fabricante do TC a impedância interna, em casos para comprar um novo TC o recomendado é utilizar o valor de $0,1 \Omega$. A Bitola do condutor deve ser escolhida conforme os valores padrões já contemplados no aplicativo, sendo 4, 6, 10 e 16 mm². A distância dos condutores deve ser considerada ida e volta dos condutores do secundário do TC até o equipamento que realizará a leitura dessas informações, como um relé de proteção em uma subestação. Alta ou baixa impedância deve ser uma escolha do projetista. Por fim, o campo de classe de exatidão são valores padrões, porém o mais comum em TCs de proteção é 10%. Após preencher essas informações clique em “Avançar”.

Na tela seguinte, deverá ser preenchido os equipamentos que serão instalados no secundário, sendo a primeira coluna os valores padrões e a segunda coluna os valores dos equipamentos caso tenha o datasheet em mãos. Portanto, caso queira somente os valores padrões, deixar a primeira coluna selecionada e ignorar a segunda coluna marcada como opcional.

Por fim a tela onde será apresentado o tipo do TC obtido com as informações inseridas anteriormente e caso queira salvar essas informações, deve apenas clicar no botão “Gerar relatório” e posteriormente gerar o relatório.

Ao clicar em “gerar relatório” o usuário será redirecionado para a página onde poderá visualizar e gerar o PDF, contendo todas as informações necessárias do projeto.

3.3 Estudo de caso 1

Para fins de validação do aplicativo desenvolvido neste trabalho, foi utilizado como referência um coordenograma elaborado por uma empresa especializada em engenharia elétrica para proteção de uma subestação de entrada de energia de um cliente da área hospitalar. Esse coordenograma foi submetido e aprovado pela concessionária de energia elétrica, o que comprova sua conformidade com as normas técnicas vigentes. Este documento foi escolhido como base comparativa por ser confiável, ter sido aprovado por órgão competente, e refletir uma situação prática e realista. A comparação entre os resultados gerados pelo coordenograma da empresa e os produzidos pelo aplicativo desenvolvido permite avaliar a fidelidade dos cálculos e a precisão do algoritmo implementado. O coordenograma está apresentado no ANEXO A. Na Figura 33, o resultado obtido pela empresa responsável do projeto, que servirá de referência na simulação do estudo de caso e validar o software desenvolvido. Neste estudo de caso, o transformador de corrente (TC) dimensionado está conforme as normas ANSI, de classe 10B50 ou, alternativamente, segundo a ABNT NBR 6856:2021, de classe 12,5 VA 10P20.

3.4 Estudo de caso 2

Este estudo de caso apresenta a simulação de um dimensionamento de um transformador de corrente que será usado para proteção de uma rede de distribuição, possuindo os seguintes valores: potência nominal do transformador da rede (S_{nominal}): 2000 kVA, potência contratada do transformador ($S_{\text{contratada}}$): 1300 kVA, tensão no enrolamento primário (V_{at}): 69,0 kV, tensão no enrolamento secundário (V_{bt}): 22,0 kV, impedância percentual do transformador ($Z_{\%}$): 0,0700%, corrente nominal no primário (I_{n_at}): 16,73 A, corrente nominal no secundário (I_{n_bt}): 52,49 A, corrente contratada no primário ($I_{\text{contr_at}}$): 10,88 kA, corrente contratada no secundário ($I_{\text{contr_bt}}$): 34,12 kA, corrente de curto circuito no primário (I_{cc_at}): 0,6099 kA, corrente de curto-circuito no secundário (I_{cc_bt}): 1,9011 kA.

Para cálculo, utilizando a corrente de curto circuito no secundário do transformador e considerando um fator de temperatura igual a 1,2 assim como um fator de sobrecorrente igual

a 20, podemos obter a corrente nominal no primário do TC, como demonstrado na equação a seguir:

$$I_{pnom(TC)} = I_{CC(BT)} \times F_T / F_S \quad (13)$$

$$I_{pnom(TC)} = 1,9011 \text{ kA} \times 1,2 / 20$$

$$I_{pnom(TC)} = 114,0654 \text{ A}$$

Levando em consideração que a corrente no secundário do TC é igual a 5 A, a relação de transformação do TC será 125:5.

Sabendo quais são os equipamentos ligados ao secundário do transformador, podemos calcular qual será a carga total em seu enrolamento secundário, a Tabela 5 mostra todos os equipamentos, assim como suas impedâncias e potência em VA.

Tabela 5 - Equipamentos conectados no secundário do TC.

Equipamento	Impedância	Potência
Impedância interna do TC	0,1200	3,000
Relé sobrecorrente	0,1200	3,000
Multimedidores digitais	0,0120	0,300
Frequencímetro registrador	0,1160	2,900
Medidor de kVArh	0,0376	0,940
Total	0,4056	10,140

Os cabos ligados ao TC possuem 110 metros de comprimento e seção de 6 mm, sendo assim, podemos obter a impedância dos condutores através da seguinte tabela multiplicado pela distância dos cabos:

Tabela 6 – Impedância dos condutores.

Bitola do condutor (mm ²)	Resistência (mΩ/m)	Reatância (mΩ/m)
4	5,5518	0,1279
6	3,7035	0,1225
10	2,2221	0,1207
16	1,3899	0,1173

Fonte: MAMEDE FILHO, 2017, p.98

Obtendo o seguinte valor

$$Z_{cabos} = 0,407385 + 0,013475j$$

Para encontrar a carga nos condutores basta multiplicar a impedância dos cabos pelo comprimento e pelo quadrado da corrente nominal secundária, conforme a equação a seguir:

$$S_{cabos} = Z_{cabos} \times L_c \times I_s^2 \quad (14)$$

$$S_{cabos} = 10,184625 + 0,336875j$$

Somando a carga nos condutores com a carga interna do TC com as cargas dos equipamentos ligados ao secundário, encontra-se a carga total em VA. Conforme equação a seguir:

$$S_{TC} = S_{int} + S_{cabos} + S_{secund} \quad (15)$$

$$S_{TC} = 20,324625 + 0,336875j$$

$$S_{TC} = 20,327417 VA$$

Dividindo a carga total em VA do TC pelo quadrado da corrente no enrolamento secundário encontra-se a máxima carga que poderá ser ligada no secundário do TC, em ohms, também conhecida como Z_{burden} . Conforme a equação a seguir:

$$Z_{burden} = S_{TC} / I_s^2 \quad (16)$$

$$Z_{burden} = 20,327417 / 25$$

$$Z_{burden} = 0,813097 \, \Omega$$

Por fim, considerando que se trata de um TC de alta reatância e seu erro admissível para a classe de exatidão igual a 10%, de acordo com a ABNT a classe adequada para o TC será A10F20C22,5.

Levando em consideração as exigências da ANSI para dimensionamento do TC, será necessário encontrar a máxima tensão que pode ocorrer no secundário do TC no instante da máxima corrente de curto circuito. Conforme a equação a seguir:

$$V_{max} = Z_{burden} \times I_s \times F_s \quad (17)$$

$$V_{max} = 0,813097 \times 5 \times 20$$

$$V_{max} = 81,31 \, V$$

Logo, a classe adequada para o TC será 10H100.

Os resultados foram compilados e podem ser observados na tabela abaixo, na qual é apresentada a classificação do TC de acordo com as normas ANSI e ABNT.

Tabela 7 – Resultados do estudo de caso 2.

ANSI	ABNT
$I_{pnom(TC)}$	114,0654 A
Z_{cabos}	$0,407385 + 0,013475j$
S_{cabos}	$10,184625 + 0,336875j$
S_{int}	10,140 VA
S_{TC}	20,327417 VA
Z_{burden}	$0,813097 \Omega$
V_{max}	81,31 V
ANSI	10H100
ABNT	A10F20C22,5

Fonte: Autores

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio da utilização do software computacional desenvolvido. Inicialmente, é analisado o coordenograma fornecido pela empresa PSO, cuja simulação foi realizada no software com o objetivo de validar o resultado obtido.

Além disso, é apresentada a simulação do estudo de caso 2, que consiste no dimensionamento de um transformador de corrente destinado à proteção de uma rede de distribuição. Por meio dessas simulações, busca-se demonstrar a aplicabilidade da ferramenta desenvolvida.

4.1 Simulação do estudo de caso 1

Conforme apresentado o estudo de caso no item 3.3, trata-se de um projeto tramitado e aprovado por uma concessionária de energia elétrica. Nesta simulação, verifica-se que o software desenvolvido é capaz de reproduzir as mesmas especificações do transformador de corrente (TC) obtidas no estudo apresentado, validando, assim, a eficácia do aplicativo proposto. Dessa forma, as Figuras 19, 20 e 21 devem ser preenchidas de acordo com os itens 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3, respectivamente, utilizando-se os valores referentes ao estudo de caso 1. A

partir desse procedimento, obtêm-se as seguintes telas.

Figura 19 - Tela de informação de projeto.

Informações de projeto

Dados necessários:

Demanda contrada (Dcon): [kW]

Fator de temperatura (Ft):

Dados de placa do transformador de potência:

Potência: [kVA] Ex.: 112,5

Impedância: [%] Ex.: 3,50

Tensão na baixa: [V] Ex.: 220/127 ou 380/220

Tensão na alta/média: [V] Ex.: 13800

Fonte: Autores

Figura 20 - Tela para inserção dos dados para calcular o TC.

Dimensionamento de Transformador de corrente

Dados necessários:

Corrente de curto-circuito (Icc): [A]

Corrente no secundário do TC (Is): [A]

Fator de sobrecorrente (FS):

Impedância interna do TC (Zint): [Ohm]

Bitola dos condutores (mm²):

Distância dos condutores (lcabos): [m]

Alta ou baixa reatância:

Classe de exatidão (%):

Classe de Proteção: *Por padrão é selecionado "P".

Fonte: Autores

Figura 21 - Tela dos equipamentos do secundário do TC.

The screenshot shows a software window titled "Carga Secundária do TC". It contains a table of electrical equipment with two columns: "Selecionar" (with checkboxes) and "Opcional" (with "Inserir valor" checkboxes and input fields). The equipment listed includes various meters and relays with their respective VA ratings. The "Relés de sobrecorrente (6 VA)" row is selected, and its optional value is set to 0,027. At the bottom, there are "Calcular" and "Voltar" buttons.

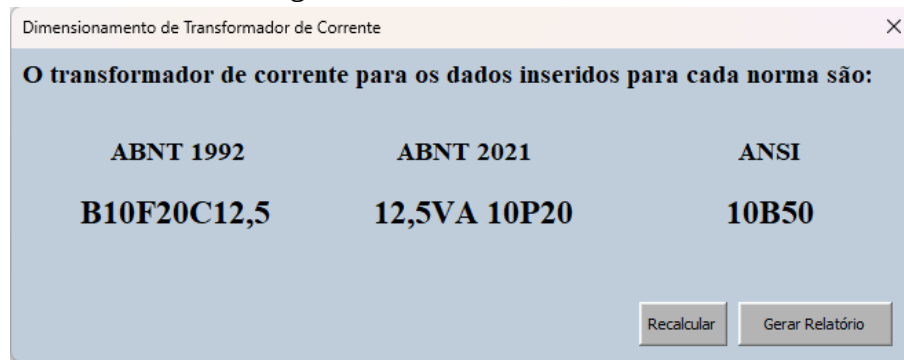
Selecionar	Equipamento	Opcional	Valor	Unidade
☐	Amperímetros registradores (3,5 VA)	☐		VA
☐	Amperímetros indicadores (2,5 VA)	☐		VA
☐	Wattímetros registradores (3,5 VA)	☐		VA
☐	Wattímetros indicadores (2,5 VA)	☐		VA
☐	Medidores registradores (5 VA)	☐		VA
☐	Medidores indicadores (5 VA)	☐		VA
☐	Frequencímetros registradores (3,5 VA)	☐		VA
☐	Frequencímetros registradores (2,5 VA)	☐		VA
☐	Multimedidores digitais (0,5 VA)	☐		VA
☒	Relés de sobrecorrente (6 VA)	☒	0,027	VA
☐	Relés direcionais (6,5 VA)	☐		VA
☐	Relés de distância (8 VA)	☐		VA
☐	Relés diferenciais (8 VA)	☐		VA
☐	Controlador de FP (0,5 VA)	☐		VA
☐	Medidor de kW - kWh (0,94 VA)	☐		VA
☐	Medidor de kVarh (0,94 VA)	☐		VA

Buttons: Calcular, Voltar

Fonte: Autores

Após o preenchimento dos itens conforme o estudo de caso 1, os resultados obtidos podem ser observados na Figura 22 e validados em comparação com a Figura 33 do estudo de caso. Com base nessa análise, conclui-se que o software desenvolvido demonstra resultados consistentes e pode ser utilizado como uma ferramenta de apoio aos profissionais na escolha do transformador de corrente adequado para a proteção de instalações elétricas.

Figura 22 - Tela de Resultados.



Dimensionamento de Transformador de Corrente

O transformador de corrente para os dados inseridos para cada norma são:

ABNT 1992	ABNT 2021	ANSI
B10F20C12,5	12,5VA 10P20	10B50

Recalcular Gerar Relatório

Fonte: Autores

Ao gerar o relatório, conforme a Figura 23 todas as informações referentes ao transformador de corrente são organizadas e compiladas em uma única página, permitindo uma visualização clara e estruturada dos resultados obtidos. Dessa forma, o usuário pode validar as informações geradas pelo software, assegurando a conformidade dos resultados.

Figura 23 - Relatório gerado pelo aplicativo.



**INSTITUTO
FEDERAL**
Minas Gerais
Campus Avançado
Ipatinga

**RELATÓRIO DE DIMENCINAMENTO DE TRANSFORMADOR DE
CORRENTE (TC)**

INFORMAÇÕES DE PROJETO		
Demanda contratada	90	kW
Potência do transformador	300	kVA
Impedância do transformador	3,5	Ω
Fator de temperatura	1	
Tensão primária	13800	V
Tensão secundária	220/127	V

DADOS PARA DIMENSIONAMENTO DO TC		
Corrente de curto-circuito	4646	A
Corrente no secundário do TC	5	A
Fator de sobrecorrente	50	
Classe de exatidão	10	%
Reatância do TC	Baixa reatância	
Relação de transformação (RTC)	100:5	
Distância dos condutores	10	m
Máxima tensão	45,6600	V

IMPEDÂNCIA DOS CONDUTORES		
Bitola do condutor	Impedância Real	Impedância Imaginária
4 mm	0,005552 Ω	0,0001279 Ω

CARGA TOTAL CONECTADA NO TC EM (VA)			
Carga interna	Potência nos cabos	Carga no secundário	Soma das cargas
10 VA	1,3880 VA	0,027 VA	11,4150 VA

IMPEDÂNCIAS DO TC	
Zburden	Zsecund
0,456600 Ω	0,0566 Ω

ESPECIFICAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE CONFORME AS NORMAS	
ANSI	10B50
ABNT 1992	B10F20C12,5
ABNT 2021	12,5VA 10P20

Assinatura do responsável técnico

Fonte: Autores

4.2 Simulação do estudo de caso 2

Para esta simulação foram inseridos os dados conforme o estudo de caso 2. Dessa forma, as Figuras 24, 25 e 26 devem ser preenchidas de acordo com os itens 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3, respectivamente, utilizando-se os valores referentes ao estudo de caso 2. A partir desse procedimento, obtêm-se as seguintes telas.

Figura 24 - Tela de informação de projeto.

A interface 'Dados de projeto' é uma janela de software com o título 'Dados de projeto' e um botão de fechar no canto superior direito. O conteúdo é organizado em seções com títulos em negrito. A primeira seção, 'Informações de projeto', contém o subtítulo 'Dados necessários:' e dois campos de entrada: 'Demanda contrada (Dcon):' com o valor '1300' e unidade '[kW]', e 'Fator de temperatura (Ft):' com o valor '1,2' e uma seta para baixo. A segunda seção, 'Dados de placa do transformador de potência:', contém quatro campos de entrada: 'Potência:' com o valor '2000' e unidade '[kVA] Ex.: 112,5'; 'Impedância:' com o valor '7' e unidade '[%] Ex.: 3,50'; 'Tensão na baixa:' com o valor '22000/12700' e unidade '[V] Ex.: 220/127 ou 380/220'; e 'Tensão na alta/média:' com o valor '69000' e unidade '[V] Ex.: 13800'. Na parte inferior direita, há dois botões: 'Avançar' e 'Sair'.

Informações de projeto	
Dados necessários:	
Demanda contrada (Dcon):	1300 [kW]
Fator de temperatura (Ft):	1,2
Dados de placa do transformador de potência:	
Potência:	2000 [kVA] Ex.: 112,5
Impedância:	7 [%] Ex.: 3,50
Tensão na baixa:	22000/12700 [V] Ex.: 220/127 ou 380/220
Tensão na alta/média:	69000 [V] Ex.: 13800

Avançar Sair

Fonte: Autores

Figura 25 - Tela para inserção dos dados para calcular o TC.

Dimensionamento de Transformador de Corrente

Dimensione o Transformador de corrente

Dados necessários:

Corrente de curto-circuito (Icc): [A]

Corrente no secundário do TC (Is): [A]

Fator de sobrecorrente (FS):

Impedância interna do TC (Zint): [Ohm]

Bitola dos condutores (mm²):

Distância dos condutores (lcabos): [m]

Alta ou baixa reatância:

Classe de exatidão (%):

Classe de Proteção: *Por padrão é selecionado "P".

*Para cálculo de FS diferentes (Ex. CEMIG para Icc, FS de 50. E instantâneo, FS de 20.

Fonte: Autores

Figura 26 - Tela dos equipamentos do secundário do TC.

Carga Secundária do TC

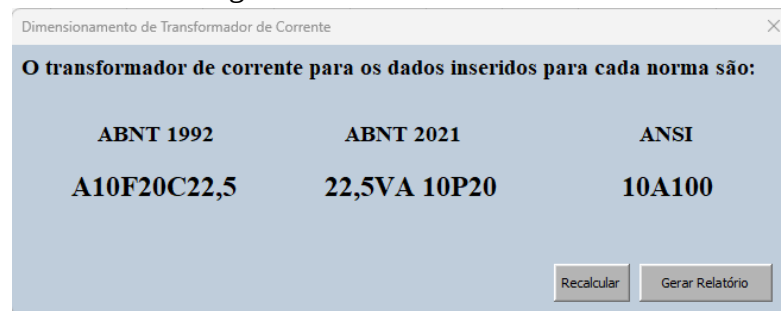
Selecione os equipamentos ligados ao secundário

		Opcional		
☐ Selecionar	Amperímetros registradores (3,5 VA)	☐ Inserir valor		VA
☐ Selecionar	Amperímetros indicadores (2,5 VA)	☐ Inserir valor		VA
☐ Selecionar	Wattímetros registradores (3,5 VA)	☐ Inserir valor		VA
☐ Selecionar	Wattímetros indicadores (2,5 VA)	☐ Inserir valor		VA
☐ Selecionar	Medidores registradores (5 VA)	☐ Inserir valor		VA
☐ Selecionar	Medidores indicadores (5 VA)	☐ Inserir valor		VA
☐ Selecionar	Frequencímetros registradores (3,5 VA)	☒ Inserir valor	2,9	VA
☐ Selecionar	Frequencímetros registradores (2,5 VA)	☐ Inserir valor		VA
☐ Selecionar	Multimedidores digitais (0,5 VA)	☒ Inserir valor	0,3	VA
☐ Selecionar	Relés de sobrecorrente (6 VA)	☒ Inserir valor	3	VA
☐ Selecionar	Relés direcionais (6,5 VA)	☐ Inserir valor		VA
☐ Selecionar	Relés de distância (8 VA)	☐ Inserir valor		VA
☐ Selecionar	Relés diferenciais (8 VA)	☐ Inserir valor		VA
☐ Selecionar	Controlador de FP (0,5 VA)	☐ Inserir valor		VA
☐ Selecionar	Medidor de kW - kWh (0,94 VA)	☐ Inserir valor		VA
☐ Selecionar	Medidor de kVArh (0,94 VA)	☒ Inserir valor	0,94	VA

Fonte: Autores

Após o preenchimento dos itens conforme o estudo de caso 2, os resultados obtidos podem ser observados na Figura 27 e validados em comparação com o resultado do estudo de caso.

Figura 27 - Tela de Resultados.



Fonte: Autores

Ao gerar o relatório, conforme a Figura 28 todas as informações referentes ao transformador de corrente são organizadas e compiladas em uma única página, permitindo uma visualização clara e estruturada dos resultados obtidos. Dessa forma, o usuário pode validar as informações geradas pelo software, assegurando a conformidade dos resultados.

Figura 28 - Relatório gerado pelo aplicativo.

RELATÓRIO DE DIMENCINAMENTO DE TRANSFORMADOR DE CORRENTE (TC)

INFORMAÇÕES DE PROJETO		
Demanda contratada	1300	kW
Potência do transformador	2000	kVA
Impedância do transformador	7	Ω
Fator de temperatura	1,2	
Tensão primária	69000	V
Tensão secundária	22000/12700	V

DADOS PARA DIMENSIONAMENTO DO TC		
Corrente de curto-circuito	1901,1	A
Corrente no secundário do TC	5	A
Fator de sobrecorrente	20	
Classe de exatidão	10	%
Reatância do TC	Alta reatancia	
Relação de transformação (RTC)	125:5	
Distância dos condutores	110	m
Máxima tensão	81,3097	V

IMPEDÂNCIA DOS CONDUTORES		
Bitola do condutor	Impedância Real	Impedância Imaginária
6 mm	0,003704 Ω	0,0001225 Ω

CARGA TOTAL CONECTADA NO TC EM (VA)			
Carga interna	Potência nos cabos	Carga no secundário	Soma das cargas
3 VA	10,1846 VA	7,14 VA	20,3274 VA

IMPEDÂNCIAS DO TC	
Zburden	Zsecund
0,813097 Ω	0,6930 Ω

ESPECIFICAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE CONFORME AS NORMAS	
ANSI	10A100
ABNT 1992	A10F20C22,5
ABNT 2021	22,5VA 10P20

Assinatura do responsável técnico

Fonte: Autores

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um software computacional para auxiliar no dimensionamento de transformadores de corrente, em conformidade com as normas ABNT NBR 6856 e ANSI/IEEE C57.13. Para isso, foram analisadas as características construtivas e funcionais dos TCs, bem como as principais grandezas e parâmetros elétricos envolvidos em sua aplicação, incluindo relação de transformação, carga nominal, fator de sobrecorrente, erros, classe de exatidão e tensão no ponto de joelho.

Com base nesses estudos, foram levantados e sistematizados os critérios normativos de dimensionamento, possibilitando a implementação dos métodos de cálculo no software proposto. A ferramenta desenvolvida permite a inserção de dados pelo usuário, o processamento das informações conforme os requisitos técnicos e a geração automática de relatórios, contribuindo para maior segurança e padronização no processo de especificação.

A validação foi realizada por meio de estudos de caso, que demonstraram a aplicabilidade, confiabilidade do software no apoio à análise e tomada de decisão em projetos elétricos. Os resultados indicam que a ferramenta atende ao objetivo proposto, facilitando o entendimento e a aplicação dos critérios de dimensionamento de TCs.

Como limitação, destaca-se a utilização da linguagem VBA, que apresenta restrições quanto à escalabilidade, interface e integração com outras plataformas. Apesar disso, o software mostrou-se adequado à proposta do trabalho.

Conclui-se, portanto, que os objetivos foram alcançados, evidenciando a importância do correto dimensionamento de transformadores de corrente e a contribuição de ferramentas computacionais no suporte a esse processo.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Roger Garcia et al. Comportamento de transformadores de corrente sob condições de energização de um transformador de potência. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6856: Transformador de corrente com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV – Especificação e ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. AMGH editora, 2013.

COELHO, Aurélio Luiz Magalhães. Análise da resposta transitória de transformadores de corrente de proteção e o impacto em relés de sobrecorrente numéricos. 2011.

GUERRA, Francisco das Chagas Fernandes et al. Modelos de transformador de corrente para estudos em baixas frequências. 2007.

HARGRAVE, Ariana; THOMPSON, Michael J.; HEILMAN, Brad. Além do ponto crítico: Um guia prático para saturação de TC. Em: 71ª Conferência Anual de Engenheiros de Relés de Proteção (CPRE) de 2018. IEEE, 2018. p. 1-23.

IEEE STD. C37.110-2007. Guia IEEE para a Aplicação de Transformadores de Corrente Utilizados para Relés de Proteção. 2023.

IEEE ANSI/IEEE C57.13: Requirements for Instrument Transformers. New York: IEEE, 2016.

KINDERMANN, Geraldo. Proteção de sistemas elétricos de potência. Editora da UFSC, v. 1, 2012.

MARDEGAN, Cláudio. Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais. São Paulo: Atitude, 2012.

MAMEDE FILHO, João. Instalações elétricas industriais: de acordo com a norma brasileira NBR 5419:2015 / João Mamede Filho. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MAMEDE FILHO, João. Manual de Equipamentos Elétricos. Grupo Gen-LTC, 2000.

MAMEDE FILHO, João - Proteção de sistemas elétricos de potência /João Mamede Filho, Daniel Ribeiro Mamede. - Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PEREIRA, Fagner de Araújo et al. Modelagem de transformadores de corrente e correção distorcidas no enrolamento secundário. 2012.

PRADO, Paula Bordin do. Estudo de saturação de transformadores de corrente aplicados em sistemas elétricos de potência. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SEGATTO, Ênio Carlos; COURY, Denis Vinicius. Redes neurais artificiais recorrentes aplicadas na correção de sinais distorcidos pela saturação de transformadores de corrente. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, v. 17, p. 424-436, 2006.

SLEMON, Gordon R. Equipamentos magnetelétricos: transdutores, transformadores e máquinas. 1974. Tese de Doutorado. Livros Técnicos e Científicos.

UMANS, Stephen D. Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7. AMGH Editora, 2014.

APÊNDICE A - CÓDIGO DA PRIMEIRA TELA

```

Private Sub CommandButton1_Click()

If Trim(CaixaCombinacao_Dcon.Value) = "" Or _
Trim(Caixacombinacao_FaT.Value) = "" Or _
Trim(CaixaCombinacao_Pn.Value) = "" Or _
Trim(CaixaCombinacao_Ztrafo.Value) = "" Or _
Trim(Caixacombinacao_Vbaixa.Value) = "" Or _
Trim(CaixaCombinacao_Vprim.Value) = "" Then

MsgBox "Por favor, preencha todas as informações antes de continuar.", vbExclamation
Exit Sub
End If

If InStr(Caixacombinacao_Vbaixa.Value, "/") = 0 Then
MsgBox "O valor da baixa tensão deve ser separado por '/' (exemplo: 220/127).", vbExclamation
Exit Sub
End If

Sheets("calculo").Range("M27").Value = CDec(CaixaCombinacao_Dcon.Value)
Sheets("calculo").Range("J4").Value = CDec(Caixacombinacao_FaT.Value)
Sheets("calculo").Range("M28").Value = CDec(CaixaCombinacao_Pn.Value)
Sheets("calculo").Range("M29").Value = CDec(CaixaCombinacao_Ztrafo.Value)
Sheets("calculo").Range("M31").Value = CDec(Split(Caixacombinacao_Vbaixa.Value, "/")(0))
Sheets("calculo").Range("M32").Value = CDec(Split(Caixacombinacao_Vbaixa.Value, "/")(1))

Sheets("calculo").Range("M30").Value = CDec(CaixaCombinacao_Vprim.Value)
Sheets("calculo").Range("M33").Value = ""

Unload Dadosconcessionária
UserForm1.Show

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

Unload Dadosconcessionária

End Sub

```

APÊNDICE B - CÓDIGO DA SEGUNDA TELA

```

Private Sub CommandButton1_Click()

If Trim(CaixaCombinacao_FS.Value) = "" Or _
Trim(CaixaCombinacao_Icc.Value) = "" Or _
Trim(CaixaCombinacao_IS.Value) = "" Or _
Trim(CaixaCombinacao_Zint.Value) = "" Or _
Trim(CaixaCombinacao_Bitola.Value) = "" Or _
Trim(CaixaCombinacao_Lcabos.Value) = "" Or _
Trim(CaixaCombinacao_Z.Value) = "" Or _
Trim(CaixaCombinacao_ClasseEX.Value) = "" Or _
Trim(CaixaCombinacao_Classeprot.Value) = "" Then

MsgBox "Por favor, preencha todos os campos obrigatórios antes de continuar.", vbExclamation
Exit Sub
End If

Sheets("calculo").Range("F4").Value = CDec(CaixaCombinacao_FS.Value)
Sheets("calculo").Range("F5").Value = CDec(CaixaCombinacao_Icc.Value)
Sheets("calculo").Range("F6").Value = CDec(CaixaCombinacao_IS.Value)
Sheets("calculo").Range("F7").Value = CDec(CaixaCombinacao_Zint.Value)
Sheets("calculo").Range("F8").Value = CDec(CaixaCombinacao_Bitola.Value)
Sheets("calculo").Range("F9").Value = CDec(CaixaCombinacao_Lcabos.Value)
Sheets("calculo").Range("E11").Value = CaixaCombinacao_Z.Value
Sheets("calculo").Range("G12").Value = CDec(CaixaCombinacao_ClasseEX.Value)
Sheets("calculo").Range("J19").Value = CaixaCombinacao_Classeprot.Value

If Trim(CaixaCombinacao_FS2.Value) <> "" Then
Sheets("calculo").Range("M33").Value = CDec(CaixaCombinacao_FS2.Value)
Else
Sheets("calculo").Range("M33").Value = ""
End If

ANSI = Sheets("calculo").Range("S26").Value & Sheets("calculo").Range("T26").Value &
Sheets("calculo").Range("U26").Value
ABNT = Sheets("calculo").Range("R16").Value & Sheets("calculo").Range("S16").Value &
Sheets("calculo").Range("T16").Value & Sheets("calculo").Range("U16").Value &
Sheets("calculo").Range("V16").Value & Sheets("calculo").Range("W16").Value

Unload UserForm1
EquipamentosSEC.Show

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

Unload UserForm1

Dadosconcessionária.Show

End Sub

```

APÊNDICE C - CÓDIGO DA TERCEIRA TELA

```

Private Sub ToggleButton1_Click()

    Dim i As Integer
    Dim chkBox As MSForms.CheckBox
    Dim valores As Variant
    Dim textBoxValue As String

    valores = Array(3.5, 2.5, 3.5, 2.5, 5, 5, 3.5, 2.5, 0.5, 6, 6.5, 8, 8, 0.5, 0.94, 0.94)

    For i = 1 To 16

        Set chkBox = Me.Controls("CheckBox" & i)
        If chkBox.Value = True Then
            Sheets("calculo").Range("O" & (8 + i)).Value = valores(i - 1)
        Else
            Sheets("calculo").Range("O" & (8 + i)).Value = 0
        End If

    Next i

    For i = 1 To 16

        Set chkBox = Me.Controls("CheckBox" & (16 + i))
        textBoxValue = Me.Controls("TextBox" & i).Text

        If chkBox.Value = True Then
            If IsNumeric(textBoxValue) Then
                Sheets("calculo").Range("O" & (8 + i)).Value = CDbl(textBoxValue)
            Else
                Sheets("calculo").Range("O" & (8 + i)).Value = 0
            End If
        End If

    Next i

    Unload EquipamentosSEC
    ResultadoTC.Show

End Sub

Private Sub ToggleButton2_Click()

    Unload EquipamentosSEC
    UserForm1.Show

End Sub

```

APÊNDICE D - CÓDIGO DA QUARTA TELA

```
Private Sub BTRelatorio_Click()
```

```
    Unload ResultadoTC  
    Sheets("Dimensionador").Visible = xlSheetVisible  
    Sheets("Dimensionador").Select
```

```
End Sub
```

```
Private Sub BTRecalcular_Click()
```

```
    Unload ResultadoTC  
    UserForm1.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()
```

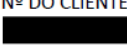
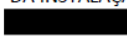
```
    Dim valorabnt As String  
    Dim valoransi As String  
    Dim valorabnt2021 As String  
  
    valoransi = Worksheets("calculo").Range("Y26").Value  
    valorabnt = Worksheets("calculo").Range("Y16").Value  
    valorabnt2021 = Worksheets("calculo").Range("Y40").Value
```

```
    Me.ResultABNT.Text = valorabnt  
    Me.ResultANSI.Text = valoransi  
    Me.ResultABNT2021.Text = valorabnt2021
```

```
End Sub
```

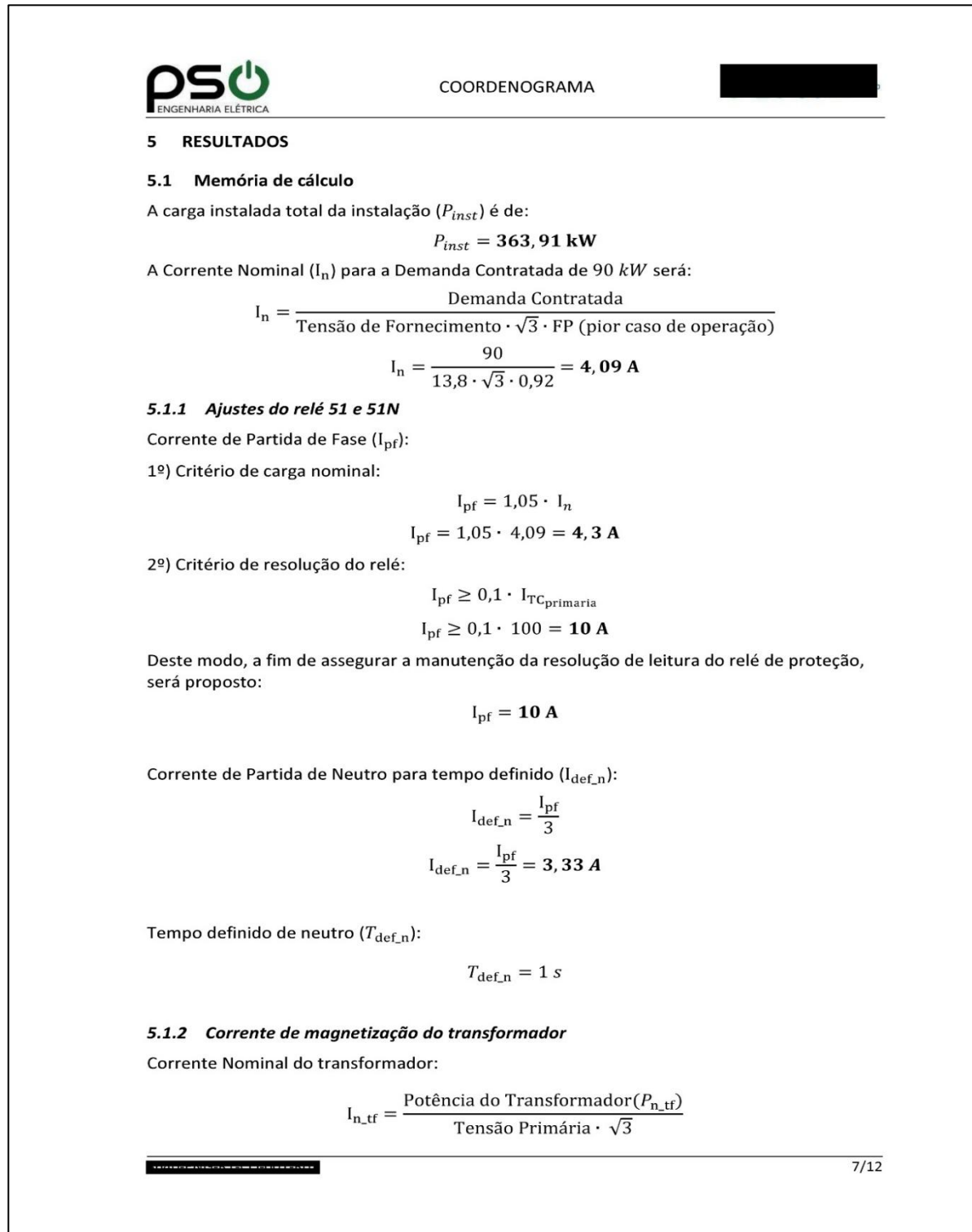
ANEXO A - COORDENOGRAMA PSO

Figura 29 - Coordenograma aprovado pela concessionária.

 ANÁLISE DE CONFORMIDADE COM AS NORMAS DA CEMIG E ABNT		INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES: Nº DO CLIENTE:  Nº DA INSTALAÇÃO:  CARGA INSTALADA (KW): 363,91 DEMANDA DA INSTALAÇÃO (KVA): 97,83 DEMANDA DE CONTRATO (KW): 90	P A R A U S O D A C E M I G
Nota de Serviço Nº: 1219059 			
APROVADO <i>Por c057849 às 10:50, 14/3/2025</i>			
- Antes de solicitar a ligação, esta instalação deve ser submetida a uma vistoria pela CEMIG. - Esta análise não isenta o responsável técnico da obra quanto à observância das normas CEMIG, ABNT e AMBIENTAIS. - Caso não seja executado no prazo de 12 meses, este projeto deverá ser submetido novamente CEMIG para análise. - Excepcionalmente nos atendimentos com obras no sistema da CEMIG para conexão de cargas ou de usina geradora, a validade do projeto elétrico aprovado pela CEMIG será até o término da obra. - A ligação ao sistema elétrico da CEMIG está condicionada a análise de viabilidade técnica e comercial, podendo haver custos ao interessado.			
	PSO - PROJETOS E SOLUÇÕES OTIMIZADAS LTDA R. JOAQUIM NABUCO, 305, CIDADE NOBRE, IPATINGA/MG - CEP: 35162-379. TEL: (31) 3616-0987 / SITE: WWW.PSOENGENHARIA.COM.BR		FORMATO: A4
TÍTULO/CONTEÚDO: COORDENOGRAMA			

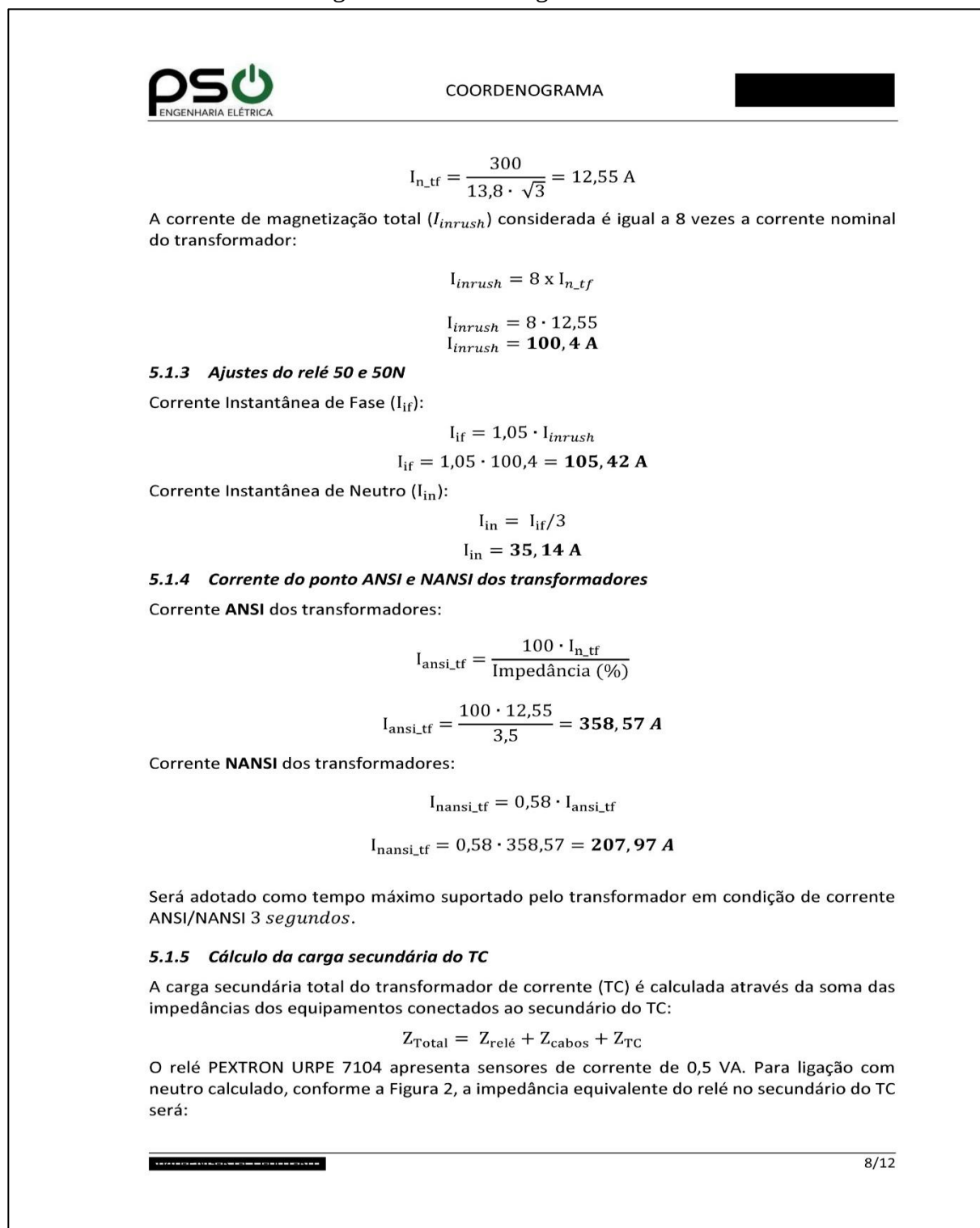
Fonte: PSO Engenharia Elétrica, 2025.

Figura 30 - Coordenograma folha 7.



Fonte: PSO Engenharia Elétrica, 2025.

Figura 31 - Coordenograma folha 8.



Fonte: PSO Engenharia Elétrica, 2025.

Figura 32 - Coordenograma folha 9.

$$Z_{\text{relé}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{S_{\text{carga}}}{(I_{\text{TC_sec}})^2} = \frac{4}{3} \cdot \frac{0,5}{5^2} = 0,027 \, \Omega$$

Utilizando condutor de cobre ($\rho = 0,017 \, \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) de $4 \, \text{mm}^2$ em uma rota de 10 m:

$$Z_{\text{cabos}} = \rho \cdot \frac{L}{A} = 0,017 \cdot \frac{10}{4} = 0,043 \, \Omega$$

Para efeito de cálculo, será considerado $Z_{\text{TC}} = 0,4 \, \Omega$, comportando cargas de até 50 VA (considera-se a carga secundária como 20% de impedância total em relação aos valores extraídos das tabelas 8 e 9 da NBR-6856 de abril/2021). Assim:

$$Z_{\text{Total}} = 0,027 + 0,043 + 0,4 = 0,47 \, \Omega$$

5.1.6 Cálculo da relação de transformação (RTC)

Pelo critério da carga nominal:

$$I_{\text{TCprimaria}} \geq I_n$$

$$I_{\text{TCprimaria}} \geq 4,09 \, \text{A}$$

Pelo critério da sobrecorrente, o item 9.1.4.2.2 da ND 5.3 estabelece que o maior valor de curto-circuito não deve exceder a corrente primária nominal em 50 vezes:

$$I_{\text{TCprimaria}} \geq \frac{I_{\text{cc-3F}}}{50}$$

$$I_{\text{TCprimaria}} \geq \frac{4646}{50}$$

$$I_{\text{TCprimaria}} \geq 92,92 \, \text{A}$$

Pelo critério de resolução (sensibilidade), o TC deve ser dimensionado para permitir a reprodução da corrente primária dentro de sua classe de exatidão para o menor ajuste proposto. Para assegurar a sensibilidade da proteção, será estipulado que a menor corrente de partida do relé (neste caso, I_{pn}) não pode ser inferior a 10% da corrente primária do TC:

$$I_{\text{TCprimaria}} \leq \frac{I_{\text{pf}}}{0,1}$$

$$I_{\text{TCprimaria}} \leq \frac{10}{0,1}$$

$$I_{\text{TCprimaria}} \leq 100 \, \text{A}$$

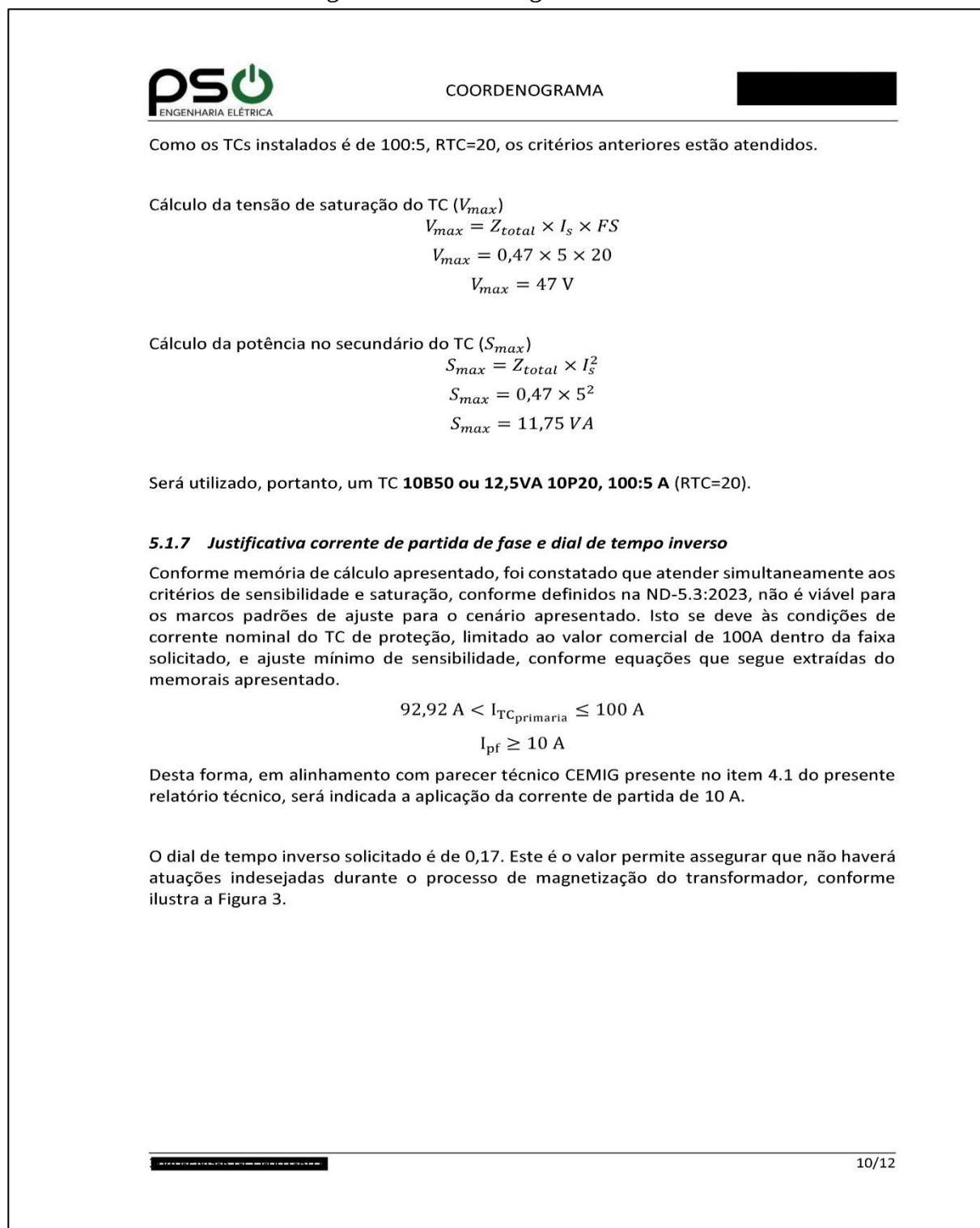
Além disso, atendendo o item 9.1.4.2.3 da ND 5.3, o valor de atuação atribuído à proteção de sobrecorrente instantânea não deve exceder a corrente primária nominal do TC em 20 vezes:

$$I_{\text{TCprimaria}} \geq \frac{I_{\text{if}}}{20}$$

$$I_{\text{TCprimaria}} \geq \frac{105,42}{20}$$

$$I_{\text{TCprimaria}} \geq 5,27 \, \text{A}$$

Figura 33 - Coordenograma folha 10.



Fonte: PSO Engenharia Elétrica, 2025.