



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JUAN JACKSON HOLANDA PONTE RIBEIRO

ESTUDO DE SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE
CONFORME A NORMA IEC 61869-2 UTILIZANDO O SOFTWARE ATPDRAW

FORTALEZA

2024

JUAN JACKSON HOLANDA PONTE RIBEIRO

ESTUDO DE SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE
CONFORME A NORMA IEC 61869-2 UTILIZANDO O SOFTWARE ATPDRAW

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado.
Coorientadora: Profa. Dra. Raquel Gregory.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R369e Ribeiro, Juan Jackson Holanda Ponte.

Estudo de saturação de transformadores de corrente conforme a norma IEC 61869-2 utilizando o software ATPDraw / Juan Jackson Holanda Ponte Ribeiro. – 2024.
79 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.

Coorientação: Profa. Dra. Raquel Cristina Filiagi Gregory.

1. Transformadores de corrente. 2. Subestação. 3. ATPDraw. 4. Relés de proteção. I. Título.

CDD 621.3

JUAN JACKSON HOLANDA PONTE RIBEIRO

ESTUDO DE SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE
CONFORME A NORMA IEC 61869-2 UTILIZANDO O SOFTWARE ATPDRAW

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 30/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Raquel Cristina Filiagi Gregory (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lucas Silveira Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais.

À minha esposa e meu filho.

Aos meus amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, por todo o apoio que sempre me ofereceram.

À minha esposa Laryssa e ao meu filho Nicolas, pelo carinho, compreensão e paciência ao longo de todo o processo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Raimundo Furtado, pela orientação e pelo valioso suporte ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À minha coorientadora, Profa. Dra. Raquel Gregory, pelas contribuições deste trabalho e ao Prof. Dr. Lucas Silveira Melo, pela disponibilidade de participar da banca.

Por fim, aos meus amigos Joel e Mota pela parceria de sempre e aos amigos de curso, especialmente do grupo High Voltage, pela companhia e momentos de descontração durante o curso e no cotidiano.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre
ombros de gigantes.”

(Isaac Newton)

RESUMO

A saturação dos transformadores de corrente (TCs) em sistemas de potência de alta tensão é um problema crítico, pois afeta diretamente a precisão dos dispositivos de proteção, como o relé, que depende de medições corretas para realizar sua função. Em cenários de curto-circuito, os TCs podem entrar em saturação, comprometendo a medição da corrente e levando a possíveis falhas operacionais, como a não atuação ou atuação indevida das proteções. Diante disso, a crescente demanda por maior confiabilidade e segurança nas redes elétricas, somada às exigências do Operador Nacional do Sistema (ONS), torna imperativo estudar e dimensionar corretamente os TCs para evitar problemas em situações críticas. Neste contexto, este trabalho tem o objetivo de analisar o comportamento dos TCs de uma subestação de 500 kV em situações de curto-circuito, com foco na sua saturação, utilizando cálculos analíticos baseados na norma IEC 61869-2 e simulações realizadas no software ATPDraw. O intuito é verificar por quanto tempo o TC mantém sua precisão durante um curto-circuito e avaliar se o equipamento atende aos requisitos mínimos exigidos para o correto funcionamento dos relés de proteção. A metodologia adotada envolveu a realização de cálculos da força eletromotriz (FEM), seguidos de simulações computacionais que reproduzem cenários de curto-circuito e observação da corrente secundária do TC, bem como o seu estado de saturação. Essa avaliação permite viabilizar meios de comparação entre os resultados analíticos e os simulados. Os resultados mostraram que os TCs analisados mantiveram sua precisão dentro do tempo adotado como limite, garantindo a correta atuação dos relés de proteção durante o curto-circuito. Esses resultados foram validados tanto pelas simulações quanto pelos cálculos analíticos, demonstrando a confiabilidade do modelo simulado e sua conformidade com as normas aplicáveis. Com base nesses resultados, os valores calculados podem ser enviados ao fabricante para o dimensionamento do TC, assegurando que o equipamento atenda às exigências do ONS e as condições operacionais da subestação estudada.

Palavras-chave: Transformadores de Corrente (TCs); Saturação; Subestação; Proteção; ATPDraw; IEC 61869-2; Curto-circuito; Relés de Proteção.

ABSTRACT

Current transformer (CT) saturation in high-voltage power systems is a critical issue, as it directly affects the accuracy of protection devices, such as relays, which depend on correct measurements to perform their function. In short-circuit scenarios, CTs can saturate, compromising current measurement and potentially leading to operational failures, such as non-operation or improper operation of protections. Given this, the increasing demand for greater reliability and safety in electrical networks, coupled with the requirements of the National System Operator (ONS), makes it imperative to study and properly size CTs to avoid problems in critical situations. This work aims to analyze the behavior of CTs in a 500 kV substation under short-circuit conditions, focusing on their saturation, using analytical calculations based on IEC 61869-2 and simulations performed in ATPDraw software. The purpose is to verify how long the CT maintains its accuracy during a short circuit and assess whether the equipment meets the minimum requirements needed for the correct operation of protective relays. The methodology involved performing electromotive force (EMF) calculations, followed by computational simulations that reproduce short-circuit scenarios and observe the CT's secondary current and saturation state. This evaluation enables a comparison between the analytical and simulated results. The results showed that the analyzed CTs maintain their accuracy within the time limit adopted, ensuring the correct operation of protective relays during the short circuit. These results were validated by both the simulations and analytical calculations, demonstrating the reliability of the simulated model and its compliance with applicable standards. Based on these results, the calculated values can be sent to the manufacturer for CT sizing, ensuring that the equipment meets the ONS requirements and the operational conditions of the studied substation.

Keywords: Current Transformers (CTs); Saturation; Substation; Electrical Protection; ATPDraw; IEC 61869-2; Short-circuit; Protection Relays.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de magnetização do TC.....	18
Figura 2 - TCs com relações múltiplas. (a) TC com vários enrolamentos primários. (b) TC com vários núcleos secundários. (c) TC com vários enrolamentos secundários. (d) TC com derivação no secundário.	23
Figura 3 - Tipos construtivos de TCs para proteção. (a) Tipo enrolado. (b) Tipo bucha. (c) Tipo janela. (d) Tipo barra.	24
Figura 4 - Circuito equivalente simplificado do TC.....	25
Figura 5 - Representação da intensidade do campo magnético (H) no enrolamento primário do TC e do fenômeno de indução eletromagnética.	31
Figura 6 - Exemplo de forma de onda da saturação AC.....	33
Figura 7 - Exemplo de forma de onda da saturação DC.....	33
Figura 8 - Efeito da saturação do TC.....	34
Figura 9 - Levantamento da curva de excitação secundária do TC.....	35
Figura 10 - Tensão de Ponto de Joelho V_k	36
Figura 11 - Máximo valor de pico da corrente de curto-circuito assimétrica.....	38
Figura 12 - Faixas de tempo relevantes para o fator de transitório.	41
Figura 13 - Fluxo magnético do TC sem "gap" durante uma falta com religamento.....	42
Figura 14 - Fluxo magnético do TC com "gap" durante uma falta com religamento.	42
Figura 15 - Fluxo magnético de um ciclo CO-CO com o maior fluxo na primeira energização.	43
Figura 16 - Levantamento das cargas secundárias para falta trifásica.....	45
Figura 17 - Levantamento de cargas secundária para falta monofásica.	45
Figura 18 - Determinação do ponto V_e e I_e para o cálculo de L_m	46
Figura 19 - Componentes do ATPDraw.	49
Figura 20 - Modelo do TC.....	50
Figura 21 - Circuito utilizado para simulações.....	51
Figura 22 – Diagrama unifilar de proteção.....	51
Figura 23 - Modelo do TC no ATP com indutor não linear <i>Type 98</i>	52
Figura 24 - Dados de entrada da fonte utilizada.	53
Figura 25 - Modelo de linha utilizado e parâmetros elétricos da SE coletora.....	55
Figura 26 - Dados de entrada da chave utilizada para faltas sem religamento.....	56
Figura 27 - Relação de transformação do TC no componente TRAF0_I do ATPdraw.	57

Figura 28 - Resistência interna dos enrolamentos do TC.....	58
Figura 29 - Curva de saturação do TC.....	59
Figura 30 - Sistema elétrico utilizado para estudo de saturação.	62
Figura 31 – Arquivo de entrada da rotina <i>Saturation</i>	63
Figura 32 - Arquivo de saída com valores de fluxo e corrente ($i \times \phi$)......	63
Figura 33 - Curva de saturação do modelo do indutor não linear tipo 98 no ATPdraw.	64
Figura 34 - Forma de onda do curto-circuito trifásico.....	64
Figura 35 - Forma de onda do curto-circuito monofásico.	65
Figura 36 - Corrente secundária da fase A ideal e real falta trifásica sem religamento.....	65
Figura 37 – Corrente do secundário e do ramo magnetizante e fluxo magnético do TC da fase A de um curto-circuito trifásico sem religamento.	66
Figura 38 - Corrente ideal e real de curto-circuito monofásico sem religamento.	67
Figura 39 - Corrente do secundário e do ramo magnetizante e fluxo magnético do TC do curto-circuito monofásico sem religamento.	67
Figura 40 - Dados de entrada da chave utilizada para faltas com religamento.	68
Figura 41 - Forma de onda do curto-circuito trifásico com religamento.....	69
Figura 42 - Forma de onda do curto-circuito monofásico com religamento.	69
Figura 43 - Corrente secundária da fase A ideal e real da falta trifásica com religamento.	70
Figura 44 - Corrente do secundário e do ramo magnetizante e fluxo magnético do TC do curto-circuito trifásico com religamento.	70
Figura 45 - Correntes ideal e real da segunda falta trifásico de ciclo CO-CO e o fluxo magnético do TC.	71
Figura 46 - Corrente ideal e real de curto-circuito monofásico na fase “A” com religamento.....	72
Figura 47 - Corrente do secundário e do ramo magnetizante e fluxo magnético do TC do curto-circuito monofásico com religamento.....	72
Figura 48 - Gráfico do limite da precisão da força eletromotriz do TC.	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores típicos para corrente nominais.....	26
Quadro 2 - Valores das correntes secundárias.	27
Quadro 3 - Fatores térmicos adotados pelas normas.	27
Quadro 4 - Fator limite da exatidão.....	28
Quadro 5 - Classes padronizada para TC de proteção.....	29
Quadro 6 - Caracterização das classes de proteção.	29
Quadro 7 - Métodos de especificação mínimos para TCs TPX, TPY e TPZ.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos de referência de eliminação de falta.....	44
Tabela 2 - Dados de curto-circuito e X/R da SE coletora.....	52
Tabela 3 - Tempo requerido pelos relés de proteção.	56
Tabela 4 - Levantamento de cargas do TC.	58
Tabela 5 - Dados do sistema para especificação do TC.....	60
Tabela 6 - Resumo de <i>Eal</i> e tempos de saturação.	73
Tabela 7 - Especificações do TC.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TC	Transformador de Corrente
F.E.M.	Força Eletromotriz
SE	Subestação
SIN	Sistema Interligado Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
IEC	International Electrotechnical Commission
ATP	Alternative Transients Program
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
RTC	Relação de Transformação do TC
C-O	“Close-Open”
C-O-C-O	“Close-Open-Close-Open”

LISTA DE SÍMBOLOS

R	Resistência
L	Indutância
Z	Impedância
X	Reatância indutiva
L_m	Indutância de magnetização
R_b	Resistência nominal dos relés somada à resistência dos cabos
K_{ssc}	Fator de curto-circuito
K_{tf}	Fator de dimensionamento transitório
ω	Frequência angular
τ	Tempo em ciclos
T_p	Constante de tempo primária
T_s	Constante de tempo secundária
t'_{al}	Tempo limite da precisão do primeiro ciclo
t''_{al}	Tempo limite da precisão do segundo ciclo
V_k	Tensão de Joelho
E_{al}	Força eletromotriz limite da precisão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Objetivos.....	19
1.1.1. Objetivo geral	19
1.1.2. Objetivo específicos.....	19
1.2. Estrutura do Trabalho	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1. Transformadores de Instrumentos.....	21
2.2. Transformadores de Corrente (TCs)	21
2.2.1. Circuito elétrico equivalente do TC.....	24
2.2.2. Principais normas e conceitos do TC de proteção.....	25
2.2.2.1. Corrente primária nominal.....	26
2.2.2.2. Corrente secundária nominal.....	26
2.2.2.3. Fator térmico nominal.....	27
2.2.2.4. Burden.....	28
2.2.2.5. ALF ou fator de sobrecorrente	28
2.2.2.6. Classe de exatidão para TCs de proteção	29
2.2.3. Princípio de funcionamento do TC.....	31
2.3. Saturação de TCs de proteção	31
2.3.1. Curva de excitação do TC	34
2.4. Tensão de joelho do TC de proteção	35
2.5. Força eletromotriz secundária do TC	36
2.6. Máxima magnitude da corrente de curto-circuito assimétrica.....	37
2.7. Fatores de dimensionamento para especificação de TCs de proteção com desempenho transitório.....	39
2.7.1. Fator de curto-circuito (<i>KSSC</i>).....	39
2.7.2. Fator de assimetria transitória (<i>KTF</i>)	39
2.8. Tempo de referência para o ciclo de operação CO-CO.....	44
2.9. Identificação das cargas secundárias em função do tipo de falta	44
2.10. Constante de tempo secundária.....	46
2.11. Considerações finais	47
3. MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1. Etapas para desenvolvimento do trabalho	48
3.2. O ATPDraw.....	48
3.3. Modelo do Transformador de Corrente proposto	49

3.4.	Sistema elétrico para estudo de saturação de TCs.....	51
3.5.	Modelagem do TC no ATPDraw	52
3.6.	Modelagem dos componentes no ATPDraw do sistema elétrico em estudo	53
3.6.1.	Fonte de tensão	53
3.6.2.	Impedância reduzida na barra e curto-circuito	53
3.6.2.1.	<i>Barramento da SE COLETORA</i>	54
3.6.3.	Cálculo do tempo de incidência de curto-circuito sem religamento	55
3.6.3.1.	<i>Barramento da SE COLETORA</i>	55
3.7.	Tempo mínimo requerido para não saturação do TC	56
3.8.	Cálculo do <i>KSSC</i> , <i>RTC</i> e resistência interna do TC.....	56
3.9.	Levantamento de cargas do secundário do TC	58
3.10.	Curva de saturação do TC e constante secundária do sistema.....	59
3.11.	Verificação analítica da força eletromotriz <i>Eal</i> para faltas trifásicas e monofásicas .	60
4.	ESTUDO DE SATURAÇÃO NO ATPDRAW	62
4.1.	Curva de saturação do indutor no ATPDraw	62
4.2.	Simulação de faltas sem religamento (C-O)	64
4.3.	Simulação de faltas com religamento (C-O-C-O)	68
4.4.	Análise dos resultados	73
4.4.1.	Cálculos da força eletromotriz do TC	73
4.4.2.	Dimensionamento da classe de proteção do TC com base no estudo de saturação	74
5.	CONCLUSÃO	76

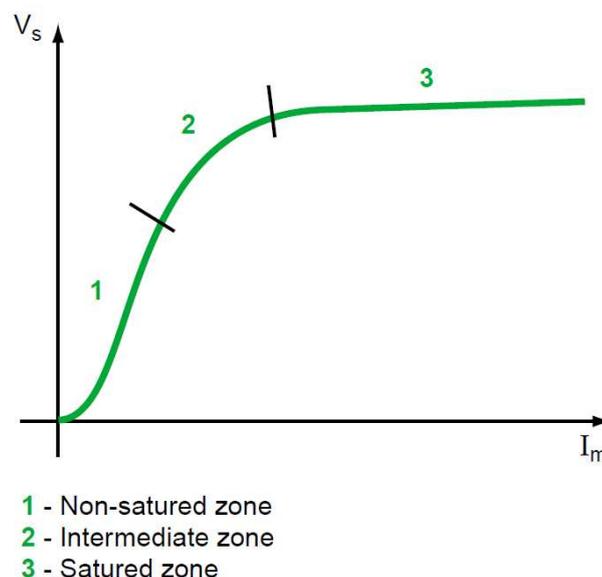
1. INTRODUÇÃO

Com o crescente interesse por fontes de energia renovável, as usinas fotovoltaicas (UFVs) têm se destacado como uma solução sustentável para a geração de eletricidade. A expansão dessas usinas no Brasil e no mundo requer o desenvolvimento de sistemas elétricos robustos e confiáveis, capazes de garantir a eficiência e a segurança das operações. Entre os componentes essenciais desses sistemas estão os transformadores de corrente (TCs), que desempenham um papel crucial nos processos de medição e proteção das instalações elétricas.

Os TCs são instrumentos utilizados para reproduzir elevados níveis de corrente em magnitudes compatíveis com as de instrumentos de medição e de proteção. Em um contexto de subestações de alta tensão, a precisão dos TCs é fundamental para assegurar o funcionamento correto dos sistemas de proteção e controle. No entanto, os TCs estão sujeitos a fenômenos como a saturação do núcleo, que pode comprometer a precisão das medições e, conseqüentemente, a confiabilidade do sistema (IEC TR 61869-100, 2017).

A saturação ocorre quando o núcleo do TC é submetido a uma densidade de fluxo magnético superior à sua capacidade de condução, resultando em distorções na corrente medida. Esse fenômeno é particularmente crítico em condições de curto-circuito, onde as correntes elevadas podem levar o TC a operar fora da zona não saturada da curva de magnetização, como pode ser observado na Figura 1. Nesse caso, o TC fornece informações distorcidas para o relé conectado, o que pode fazer com que o relé se comporte de maneira inesperada (Hargrave et al., 2018), que pode causar a atuação indevida ou a não atuação das proteções.

Figura 1 - Curva de magnetização do TC.



Fonte: Fonti (2000).

Para mitigar esses riscos e atender aos requisitos estabelecidos nos Procedimentos de Redes do Operador Nacional de Sistema Elétrico (ONS), bem como das normas nacionais e internacionais, é essencial realizar um estudo detalhado do comportamento dos TCs em situações de curto-circuito para assegurar que o núcleo não sature durante curtos-circuitos e religamentos rápidos, atendendo à relação X/R do ponto de instalação (resposta transitória) (ONS, 2022).

Neste contexto, destaca-se o software ATPDraw, o qual se trata de uma ferramenta amplamente utilizada para a análise de transitórios eletromagnéticos em sistema de potência. Dessa forma, o software pode ser prontamente empregado para a avaliação precisa do desempenho dos TCs em condições de curto-circuito.

Diante das considerações levantadas, destaca-se que este trabalho se propõe a contribuir com a compreensão dos desafios associados ao uso de TCs em ambientes de alta tensão, além de reforçar a importância do uso de software gratuitos como o ATPDraw para o desenvolvimento e validação de projetos confiáveis e economicamente viáveis.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo de saturação de transformador de corrente de uma subestação coletora integrada ao SIN utilizando o software ATPDraw.

1.1.2. Objetivo específicos

Além do objetivo geral, o presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Analisar os efeitos da saturação em diferentes cenários de curto-circuito;
- Realizar uma avaliação do instrumento à luz da IEC 61869-2;
- Realizar uma avaliação do instrumento via simulações computacionais no software ATPDraw;
- Comparar os resultados das simulações do ATPDraw com os resultados obtidos analiticamente;

1.2. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- No Capítulo 2, são apresentados os fundamentos teóricos e a revisão bibliográfica, abordando conceitos sobre transformadores de instrumentação, com ênfase nos transformadores de corrente (TCs). São explorados temas como a saturação e os fatores de dimensionamento necessários para evitar a saturação pela norma IEC 61869-2;
- No Capítulo 3, são descritas as metodologias utilizadas no estudo, incluindo a modelagem do sistema elétrico simplificado e do transformador de corrente no software ATPDraw;
- No Capítulo 4, é realizada a verificação analítica da saturação dos TCs, onde são calculados os parâmetros elétricos do sistema e do TC para o cálculo do limite da precisão da força eletromotriz secundária pelas equações da norma IEC 61869-2, bem como são modelados os diferentes tipos de curto-circuito, analisados a saturação dos TCs no software ATPDraw e os resultados são comparados com cálculos da norma IEC 61869-2. Além disso, é feito um dimensionamento do TC com base nos valores encontrados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão abordados os conceitos teóricos fundamentais que embasam este trabalho, com foco nos transformadores de corrente (TCs). Serão apresentados o princípio de funcionamento dos TCs, suas características construtivas, bem como os fenômenos relacionados à saturação em condições de curto-circuito. Além disso, será discutida o dimensionamento dos TCs para garantir a precisão na proteção dos sistemas elétricos. As normas e procedimentos utilizados, como a IEC 61869-2, também serão explorados, junto com os parâmetros críticos que influenciam o desempenho dos TCs em sistemas de alta tensão.

2.1. Transformadores de Instrumentos

Os transformadores de instrumentos, segundo a norma ABNT NBR IEC 61869-1, são transformadores destinados a transmitir um sinal de informação para instrumentos de medição e dispositivos de controle ou de proteção, ou aparelhos similares.

Os transformadores de instrumentação podem ser divididos entre transformadores de corrente, transformadores de potencial (indutivo ou capacitivo) e transformadores combinados de instrumentação, este último sendo a combinação dos dois primeiros (CIARLINI, 2019).

Neste trabalho será abordado os transformadores de instrumentos do tipo transformadores de corrente aplicado a proteção.

2.2. Transformadores de Corrente (TCs)

Segundo a norma IEC 61869-2, o transformador de corrente (TC) é um transformador para instrumentos cuja corrente secundária, em condições normais de uso, é proporcional à corrente primária, divergindo dela em fase, por um ângulo de aproximadamente zero para uma configuração apropriada das conexões.

Isto é, o TC deve reproduzir, no seu secundário, uma corrente que é uma réplica em escala da corrente do primário do sistema elétrico. Os TCs transformam, por meio do fenômeno de conversão eletromagnética, correntes elevadas, que circulam no seu primário, em pequenas correntes secundárias, segundo uma relação de transformação (Mamede Filho, 2020).

Segundo (Santos, 2015) um TC tem basicamente três finalidades:

- ✓ Isolar do circuito de alta tensão os equipamentos conectados em seu secundário;
- ✓ Fornecer em seu secundário uma forma de onda de corrente proporcional a do primário, em módulo e fase;
- ✓ Fornecer no secundário uma corrente em níveis aceitáveis aos equipamentos a ele conectados.

A relação de transformação de um TC (ou RTC) é a relação entre as espiras do secundário (quantidade maior de enrolamentos) e do primário (quantidade menor de enrolamentos), conforme equação (1).

$$RTC = \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

Sendo:

N_1 : número de espiras no enrolamento primário do TC;

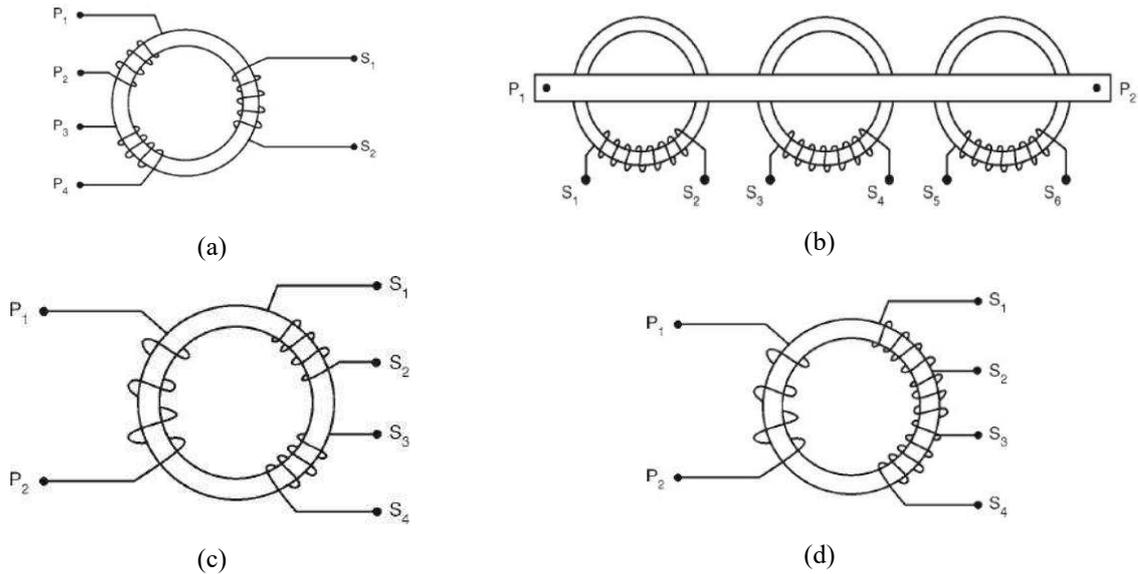
N_2 : número de espiras no enrolamento secundário do TC.

Os TCs podem ser constituídos com vários enrolamentos primários, com vários núcleos magnéticos secundários ou com vários enrolamentos secundários (Mamede Filho, 2020) de acordo com o seguinte:

- Com vários enrolamentos primários montados isoladamente e apenas um enrolamento secundário, conforme a Figura 2 (a).
- Com vários núcleos secundários, os quais são constituídos de dois ou mais enrolamentos secundários, sendo que cada um desses enrolamentos possui individualmente seu núcleo, conforme a Figura 2 (b);
- Com vários enrolamentos secundários, os quais são constituídos de apenas um único núcleo que envolve o enrolamento primários e os vários enrolamentos secundários, conforme mostra a Figura 2 (c).
- Com derivação no secundário, onde um núcleo único é envolvido pelos enrolamentos primário e secundário, sendo este provido de uma ou mais derivações, conforme mostra a Figura 2 (d)

Na Figura 2 são ilustradas as quatro configurações mencionadas.

Figura 2 - TCs com relações múltiplas. (a) TC com vários enrolamentos primários. (b) TC com vários núcleos secundários. (c) TC com vários enrolamentos secundários. (d) TC com derivação no secundário.



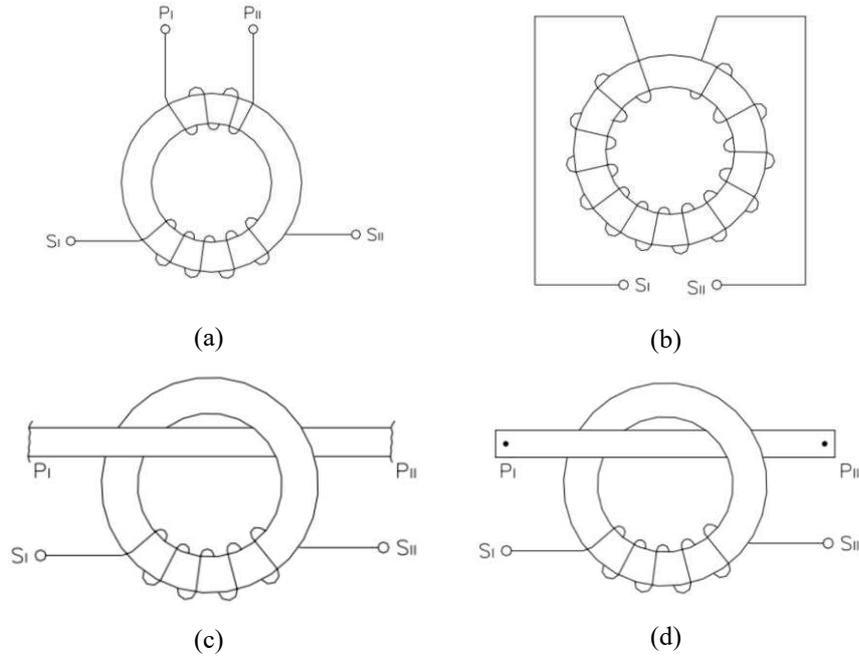
Fonte: Mamede Filho (2020).

Quanto aos aspectos construtivos, os TCs podem ser classificados de acordo com o modelo do enrolamento primário e com o formato do núcleo (IEEE Std C37-110-2023). Os principais tipos construtivos de TC são:

- TC tipo enrolado – O enrolamento primário é formado por uma ou mais espiras que envolvem mecanicamente o núcleo. Os enrolamentos primários e secundário são isolados entre si e isolados do núcleo, tudo em uma única estrutura;
- TC tipo bucha – Transformador de núcleo toroidal com enrolamento secundário acoplado ao núcleo e isolado deste. Usa um condutor completamente isolado que passa no interior do núcleo como enrolamento primário;
- TC tipo janela – Semelhante ao tipo bucha, possui enrolamento secundário isolado e permanentemente acoplado ao núcleo, mas não possui enrolamento primário como parte integrante da estrutura. Um condutor que passa pelo interior do núcleo é utilizado como enrolamento primário.

- TC tipo barra – TC em que o primário é constituído de uma barra montada permanentemente através do núcleo.

Figura 3 - Tipos construtivos de TCs para proteção. (a) Tipo enrolado. (b) Tipo bucha. (c) Tipo janela. (d) Tipo barra.

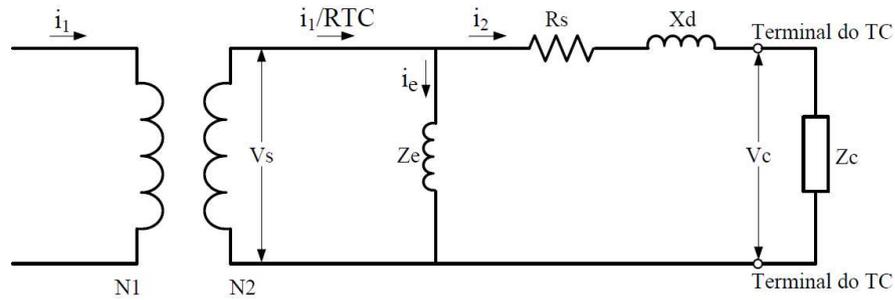


Fonte: Adaptado de SAMPAIO (2021).

2.2.1. Circuito elétrico equivalente do TC

Como a ocorrência de transitórios nos sistemas de potência tem influência na resposta dos TCs, ambas as condições de regime permanente e transitório devem ser consideradas quando se examinam as características de um TC (Santos, 2015). A Figura 4 mostra o circuito equivalente simplificado de um TC conectado a uma carga, a qual está ligada um dispositivo de proteção. As impedâncias de dispersão primária e a parte reativa do terminal secundário podem ser desconsideradas, uma vez que não afetam substancialmente o seu desempenho (IEEE Std C37-110-2023).

Figura 4 - Circuito equivalente simplificado do TC.



Fonte: Santos (2015).

Na Figura 4, i_1 representa a corrente primária, composta pela componente CA e CC, V_s a tensão secundária de excitação, i_e a corrente de excitação, i_1/RTC a corrente secundária total, Z_e a impedância do ramo de excitação, i_2 a corrente secundária que flui pela carga, R_s a resistência do enrolamento secundário, X_d a reatância de dispersão, V_c a tensão na carga e Z_c a impedância da carga. N_1 e N_2 representam o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente. N_2/N_1 é a razão de espiras do TC (RTC).

O valor de i_e é muito pequeno em condições normais de operação do TC (região linear da curva de magnetização do núcleo) e o erro causado por essa corrente é desprezível. Entretanto, em situações em que a corrente primária é muito elevada (curto-circuito), o TC pode entrar na porção não-linear da curva de excitação do núcleo, causando erros consideráveis à transformação como consequência do incremento desproporcional nos valores de i_e . Esse incremento causa distorções consideráveis na forma de onda da corrente que flui no secundário do TC. Os erros máximos admitidos para TCs de proteção são de 2,5% e 10%. Para serviço de proteção, valor mais comumente usados é o de 10% (IEEE Std C37.110-2023).

2.2.2. Principais normas e conceitos do TC de proteção

A padronização das normas técnicas para Transformadores de Corrente (TC) para fins de proteção garante o desempenho confiável e preciso desses equipamentos em sistemas elétricos. As normas estabelecem os critérios que os TCs devem seguir para atender às necessidades de proteção, tanto em condições normais quanto em situações de transitórios de corrente. As principais normas são as IEC 61869-2, IEC 60044-1 e IEC 60044-6 (substituídas pela IEC 61869-2), IEEE Std C57.13 e NBR 6856, bem como os guia IEEE Std C37.110 e IEC TR 61869-100, que foram utilizados ao longo dos anos para padronizar os requisitos de projeto, fabricação e operação dos TCs.

A seguir serão vistos alguns dos principais conceitos para especificações dos TCs.

2.2.2.1. Corrente primária nominal

Segundo a (IEC 61869-2, 2012) e (ABNT NBR 6856, 2021), a corrente primária nominal é o valor de corrente primária na qual o desempenho do transformador se baseia. As correntes nominais do primário são normalmente associadas às correntes nominais dos circuitos onde eles serão aplicados. A escolha, se possível, deve levar em consideração as sobrecargas permitidas no sistema. O Quadro 1 ilustra os valores típicos para as correntes nominais de diferentes normas.

Quadro 1 - Valores típicos para corrente nominais.

Norma	Valores Padrões de Corrente Primária	Observações
IEC 60044-1	10 – 12,5–15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 A	Seus múltiplos decimais ou frações
IEC 61869-2	10 – 12,5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 A	Seus múltiplos decimais ou frações
IEEE C57.13	10 – 15 – 25 – 40 – 50 – 75 – 100 – 200 – 300 – 400 – 600 – 800 – 1,2k – 1,5k – 2k – 3k – 4k – 5k – 6k – 8k e 12k	Há também possibilidade de ligações série-paralelo no primário e de taps no secundário, porém, são utilizados sempre esses valores de corrente
NBR 6856 1992	5 – 10 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 – 100 – 150 – 200 – 250 – 300 – 400 – 500 – 600 – 800 – 1k – 1,2k – 1,5k – 2k – 2,5k – 3k – 4k – 5k – 6k – 8k	-
NBR 6856 2015	5 – 10 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 – 100 – 150 – 200 – 250 – 300 – 400 – 500 – 600 – 800 – 1k – 1,2k – 1,5k – 2k – 2,5k – 3k – 4k – 5k – 6k – 8k	-

Fonte: PEREIRA et al. (2017).

2.2.2.2. Corrente secundária nominal

Segundo a (IEC 61869-2, 2012) e (ABNT NBR 6856, 2021), a corrente secundária nominal é o valor de corrente secundária na qual o desempenho do transformador se baseia. A corrente secundária geralmente é padronizada em 1 A, 2 A ou 5 A, conforme ilustra o Quadro 2.

Quadro 2 - Valores das correntes secundárias.

Norma	Valores Padrões de Corrente Secundária	Observações
IEC 60044-1	1, 2 ou 5A	Também são considerados padrões esses valores divididos por raiz de 3 devido à conexão em delta
IEC 61869-2	1 ou 5A	Para classes TPX, TPY e TPZ, a corrente nominal é 1A
IEEE C57.13	5A	-
NBR 6856 1992	1, 2 ou 5A	-
NBR 6856 2015	1 ou 5A	Para TCs ligados em delta os valores de 1 e 5 divididos por raiz de 3 também são considerados padrões

Fonte: PEREIRA et al. (2017).

2.2.2.3. Fator térmico nominal

Fator térmico nominal é o fator que multiplica a corrente primária nominal de um transformador de corrente para obter a corrente primária máxima que ele é capaz de conduzir em regime contínuo à frequência nominal e com a maior carga especificada, sem exceder os limites de elevação de temperatura e da classe de exatidão (ABNT NBR 6856, 2021). O Quadro 3 ilustra os vários fatores térmicos adotados. Tipicamente eles variam de 1,0 (quando não existe necessidade da previsão de suportabilidade adicional, ou seja, a corrente vai até a corrente nominal do primário), até valores de 2,0 (o dobro da corrente nominal) (PEREIRA et al., 2017a).

Quadro 3 - Fatores térmicos adotados pelas normas.

Norma	Valores Padrões de Fator Térmico	Observações
IEC 60044-1	120% - 150% - 200%	Normalmente a corrente de limite térmico é igual a corrente nominal do primário, mas quando não é, esses são os valores mais usados
IEC 61869-2	120% - 150% - 200%	
IEEE C57.13	1.0 – 1.33 – 1.5 – 2.0 – 3.0 – 4.0	-
NBR 6856 1992	1.0 – 1.2 – 1.3 – 1.5 – 2.0	-
NBR 6856 2015	1.0 – 1.2 – 1.3 – 1.5 – 2.0	-

Fonte: PEREIRA et al. (2017).

2.2.2.4. Burden

Segundo a (IEC 61869-2, 2012), “burden” é a carga nominal sobre a qual os requisitos de exatidão são baseados. É a carga máxima, expressa em VA ou Ohms, que pode ser conectada no secundário de um TC, sem perder precisão e características operacionais para as quais o instrumento foi especificado (PEREIRA et al., 2017a). Segundo a norma (IEC 61869-2, 2012), os valores padrões de “burden” são definidos como 2,5-5-10-15-30 VA.

2.2.2.5. ALF ou fator de sobrecorrente

O *Accuracy Limit Factor* (ALF) é definido como a relação entre a corrente primária limite de exatidão nominal e a corrente primária nominal (IEC 61869-2, 2012), (ABNT NBR 6856, 2021). Ou seja, o fator ALF é usado para definir o limite de corrente, múltiplo da corrente primária nominal do TC, a qual garante reproduzir no secundário uma corrente que mantém a precisão adotada. Esse fator também é conhecido como fator de sobrecorrente. O Quadro 4 mostra os fatores adotados em diferentes normas. Atualmente, a (ABNT NBR 6856, 2021) estipula os fatores ALF como 5-10-15-20-30.

Quadro 4 - Fator limite da exatidão.

Norma	Fator limite de exatidão
IEC 60044-1	5 – 10 – 15 – 20 – 30
IEC 60044-6	3, 5, 7.5, 12.5, 15, 17.5, 20, 25, 30, 40, 50
IEC 61869-2	5 – 10 – 15 – 20 – 30
IEEE C57.13	Define corrente simétrica máxima para 1 Segundo
NBR 6856 1992	Não há menção sobre o ALF
NBR 6856 2015	5 – 10 – 15 – 20 – 30

Fonte: PEREIRA et al. (2017).

Dependendo do nível de curto-circuito, os transformadores de corrente podem ser adquiridos especificando-se um fator de corrente, que varia de 5 a 30. Se o nível de curto-circuito ultrapassar o valor de 30, é possível aumentar a corrente nominal do TC para adquirir um equipamento que atenda às normas. Caso contrário, será necessário solicitar um TC fora dos padrões normatizados, o que geralmente implica em um projeto especial e custos mais elevados (PEREIRA et al., 2017).

Segundo a (ABNT NBR 6856, 2021), a norma não se aplica a TC com resposta em regime transitório. Neste caso, o fator ALF é aplicado para correntes de curto-circuito simétricas.

2.2.2.6. Classe de exatidão para TCs de proteção

A classe de exatidão é a designação atribuída a um transformador para instrumentos, cujo erro de relação e de deslocamento de fase se mantém dentro dos limites especificados, em condições preestabelecidas (ABNT NBR 6856, 2021). O Quadro 5 apresenta um resumo das classes de proteção padronizadas pelas diferentes normas.

Quadro 5 - Classes padronizada para TC de proteção.

Norma	Classes padronizadas para TC de proteção	Observações
IEC 60044-1	5P – 10P – 5PR – 10PR	-
IEC 60044-6	TPS – TPX – TPY – TPZ	-
IEC 61869-2	5P – 10P – 5PR – 10PR – PX – PXR – TPX – TPY – TPZ	-
IEEE C57.13	C – T – X	-
NBR 6856 1992	A – B	A – Alta impedância B – Baixa impedância
NBR 6856 2015	5P – 10P – 5PR – 10PR – PX – PXR	A NBR não enquadra os TCs com resposta a transitórios

Fonte: PEREIRA et al. (2017).

A nomenclatura da classe de exatidão é representada pelo tipo de TCs (P, PR, PX, PXR), precedido do valor expresso em porcentagem, que corresponde ao maior erro composto da corrente nominal multiplicada pelo fator limite de exatidão especificado (ABNT NBR 6856, 2021). Os tipos de TCs são especificados no Quadro 6 da norma NBR6856.

Quadro 6 - Caracterização das classes de proteção.

Designação	Limite para fluxo remanescente	Explicação
P	Não	Especifica um transformador de corrente que cumpre com os requisitos de uma corrente de curto-circuito simétrica.
PR	Sim	
PX	Não	Especifica um transformador de corrente pela determinação de suas características de magnetização.
PXR	Sim	
NOTA Para distinguir entre as classes P e PR ou entre as classes PX e PXR, utilizar o critério de fluxo remanescente.		

Fonte: ABNT NBR 6856 (2021).

A norma (IEC 61869-2, 2012) também expressa os TCs considerados com especificações para atender os requisitos de erro transitório sob as condições de faltas assimétricas. Os tipos TPX e TPY têm a sua definição de erro considerando as componentes

AC e DC da corrente de falta, mas o tipo TPZ tem o erro referido somente a componente AC, pois ele tende a filtrar a componente DC da corrente de falta devido a sua característica de baixa impedância de magnetização, ou seja, o gap de ar é bem maior do que no tipo TPY. Os erros limite transitórios são definidos como 10% para as classes TPX, TPY e TPZ. A norma define as classes como:

- TPX: sem controle do fluxo residual. A saturação em curtos transitórios é especificada em função do pico do erro instantâneo. Normalmente, como não há controle do fluxo residual, os núcleos desses transformadores são todo de ferro.
- TPY: nesta classe há controle do fluxo residual (<10%), normalmente com a introdução de um pequeno gap de ar agregado ao núcleo de ferro. O comportamento da saturação durante o curto transitório é definido pelo valor de pico do erro instantâneo.
- TPZ – nesta classe os TCs possuem um gap de ar maior para que ele se caracterize como linear, possui uma constante de tempo do secundário definida e, portanto, filtram a componente exponencial da corrente de falta. O erro é definido pelo valor de pico da componente AC. Devido a forma de construção do TC, o fluxo residual pode ser negligenciado (<<10%).

A norma IEC 61869-2 ilustra dois métodos de especificação mínima da classe de proteção do TCs de desempenho transitórios.

Quadro 7 - Métodos de especificação mínimos para TCs TPX, TPY e TPZ.

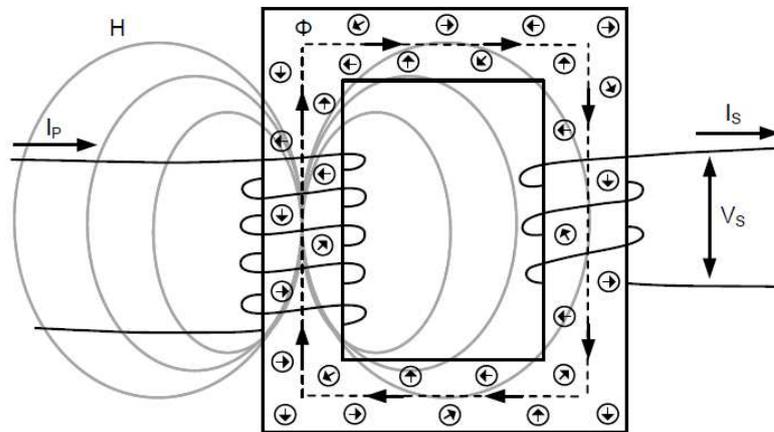
Standard specification	Alternative specification
Class designation (TPX, TPY or TPZ)	Class designation (TPX, TPY or TPZ)
Rated symmetrical short-circuit current factor K_{SSC}	Rated symmetrical short-circuit current factor K_{SSC}
Duty cycle, consisting of for C-O cycle: t'_{al} for C-O-C-O cycle: $t'_{al}, t', t_{fr}, t''_{al}$	Rated value of transient dimensioning factor K_{td} Rated value of secondary loop time constant T_S (for TPY cores only)
Rated primary time constant T_p	
Rated resistive burden R_b	Rated resistive burden R_b

Fonte: IEC 61869-2 (2012).

2.2.3. Princípio de funcionamento do TC

Os transformadores de corrente, conforme comentado anteriormente, trabalham baseados no princípio da indução magnética. Assim, quando uma corrente alternada I_P flui por meio do enrolamento primário do transformador, ela gera um campo magnético alternado (H) que corresponde a um fluxo magnético alternado (Φ) pelo núcleo do transformador. O fluxo magnético alternado (Φ) passa através dos enrolamentos secundários, o qual geralmente está ligado a uma carga (um relé, por exemplo). Dessa forma, o fluxo magnético alternado (Φ) induz a uma tensão alternada secundária (V_S) entre os enrolamentos secundários. Esta tensão V_S , aplicada a um circuito fechado, induzirá uma corrente secundária I_S nos enrolamentos secundários do transformador, criando seu próprio campo magnético e fluxo magnético alternado que se opõe ao fluxo magnético criado pela corrente primária I_P . Dessa forma, os fluxos magnéticos primários e secundários se cancelam, levando a uma quantidade insignificante de fluxo magnético líquido dentro do núcleo do transformador (Hargrave et al., 2018). A Figura 5 apresenta o fenômeno da indução eletromagnética em um TC.

Figura 5 - Representação da intensidade do campo magnético (H) no enrolamento primário do TC e do fenômeno de indução eletromagnética.



Fonte: Hargrave et al. (2018).

2.3. Saturação de TCs de proteção

A saturação é o estado onde os transformadores de correntes saem da região de resposta linear da corrente do primário e, por consequência, também da corrente do secundário, que não mantém a proporção da corrente do primário. Assim, enquanto o transformador estiver operando em uma tensão secundária menor que a tensão de saturação, a corrente secundária se

mantém na região linear, porém se o transformador de corrente estiver operando com a tensão secundária maior que a tensão de saturação, a relação não será mais mantida. Dessa forma, a corrente secundária não mais terá a forma de onda senoidal e não mais reproduzirá fielmente a corrente primária. Na prática isto ocorre quando a densidade de fluxo magnético $B(t)$ excede a densidade de fluxo máxima para a qual o TC foi projetado.

Fatores que promovem a saturação do TC:

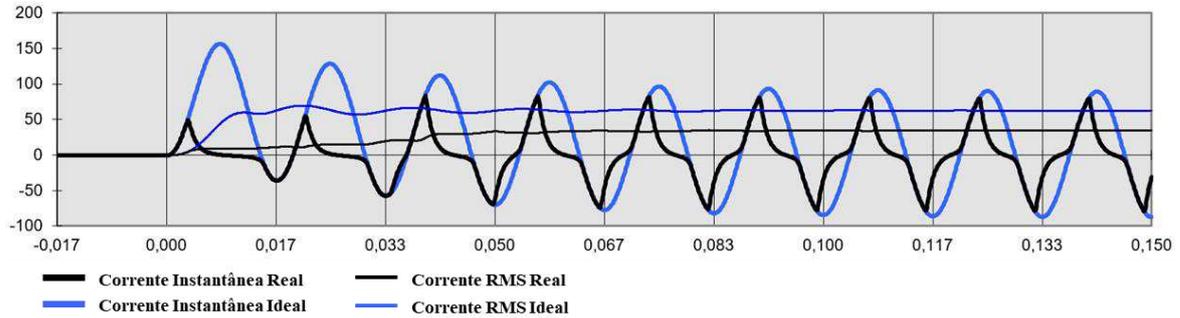
- Elevado “burden” (carga conectada) secundário;
- Elevada corrente primária;
- Assimetria da corrente de falta;
- Fluxo remanescente no núcleo do TC.

A saturação acontece devido ao processo de indução eletromagnética. O núcleo de um TC possui quantidade limitada de dipolos magnéticos, que estão aleatoriamente posicionados no núcleo. Quando a corrente do primário flui através dos enrolamentos primários, a força do campo magnético afeta os dipolos magnéticos e faz estes se alinharem, na mesma direção que o campo, para produzir o fluxo magnético. Dessa forma, quanto mais corrente primária, mais forte se torna o campo magnético e mais dipolos magnéticos ficam alinhados. Quando todos os dipolos magnéticos estão alinhados na mesma direção, é atingido o máximo de fluxo magnético no núcleo e o TC é dito como saturado (Hargrave et al., 2018). A saturação pode ser classificada em dois tipos:

- a) Saturação AC
- b) Saturação DC

A saturação AC é aquela que continua existindo após decorrido o tempo para a componente contínua da corrente de curto-circuito tenha sido completamente amortecida, como pode ser observado na Figura 6. Nesta figura, as linhas grossas azul e preto são as correntes ideal e real, respectivamente, no lado secundário do TC. As linhas finas azul e preto são os valores eficaz de corrente (valor “RMS”), observe que os valores eficazes de corrente ficam em paralelo e não se encontram, comprovando que o TC não perde a saturação.

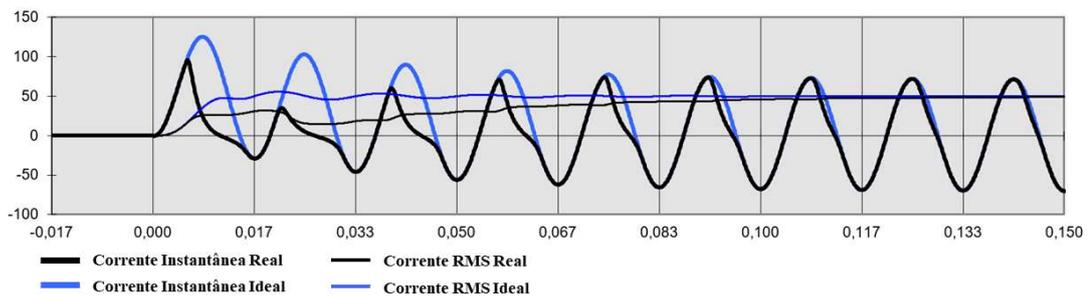
Figura 6 - Exemplo de forma de onda da saturação AC.



Fonte: Adaptado de Mardegan (2022).

A saturação DC é a que existe nos primeiros ciclos após o início da falta e depois desaparece conforme a componente DC da corrente de curto-circuito é amortecida, como pode ser observado na Figura 7. Isso também pode ser confirmado pelo valor eficaz da corrente da forma de onda não saturada e saturada, que se “encontram” após 117 ms.

Figura 7 - Exemplo de forma de onda da saturação DC.

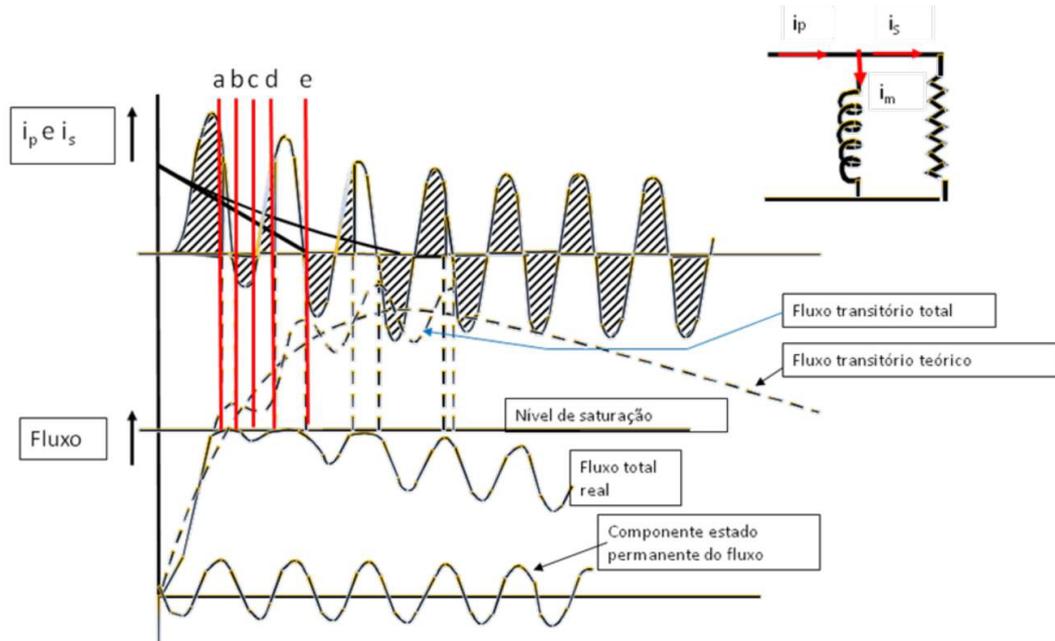


Fonte: Adaptado de (Mardegan, 2022).

A Figura 8 ilustra o fenômeno da saturação de forma didática. Nesta, assume-se que o TC possui indutância constante na região linear e no caso da saturação, a indutância tende a zero. Dessa forma, percebe-se o fluxo transitório total, composto pelos fluxos das componentes CA e CC, atinge um valor máximo teórico, caso não houvesse saturação. No entanto, no instante “a”, o TC atinge o nível de saturação, a indutância de magnetização tende a zero e a corrente de magnetização tende a assumir o valor da corrente primária, consequentemente, a corrente secundária vai a zero. Isso permanece até o instante “b”, onde a corrente do primário inverte a polaridade e o fluxo passa então a diminuir sua amplitude. Durante todo o período que a corrente ficou com a polaridade invertida, de “b” a “c”, o fluxo vai decrescendo e, portanto, saindo do limite da saturação. A partir do momento que a corrente fica positiva novamente, “c” até “d”, o

fluxo começa a crescer novamente e atinge seu limite em “d”, e a corrente do secundário tende a desaparecer novamente (PEREIRA et al., 2017b).

Figura 8 - Efeito da saturação do TC.



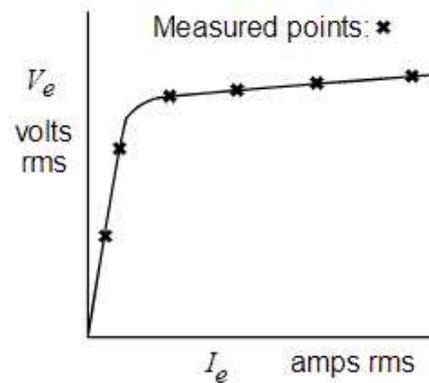
Fonte: PEREIRA et al. (2017).

A Figura 8 ilustra como hachurado as regiões em que a corrente do secundário está relativamente igual a corrente do primário (considerando a relação 1:1) e as regiões não hachuradas indicam que a corrente primária desaparece devido a saturação. Neste caso, a saturação é devido a componente CC e, portanto, o fenômeno transitório some após a componente CC desaparecer e o TC passa a representar no secundário uma réplica da corrente primária.

2.3.1. Curva de excitação do TC

A curva de excitação do TC é um dado do fabricante ou pode ser obtida a partir de medições de tensão e corrente no secundário do TC. O teste consiste em abrir o circuito primário e aplicar uma tensão conhecida nos terminais secundário e medir a corrente que flui através da fonte e do TC. Assim, a tensão de aplicação é a V_E (tensão de excitação do ramo magnetizante) e a corrente medida é I_E (corrente de excitação do ramo magnetizante). O usuário pode plotar a curva V_E - I_E para vários valores de V_E (Hargrave et al., 2018), conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Levantamento da curva de excitação secundária do TC.



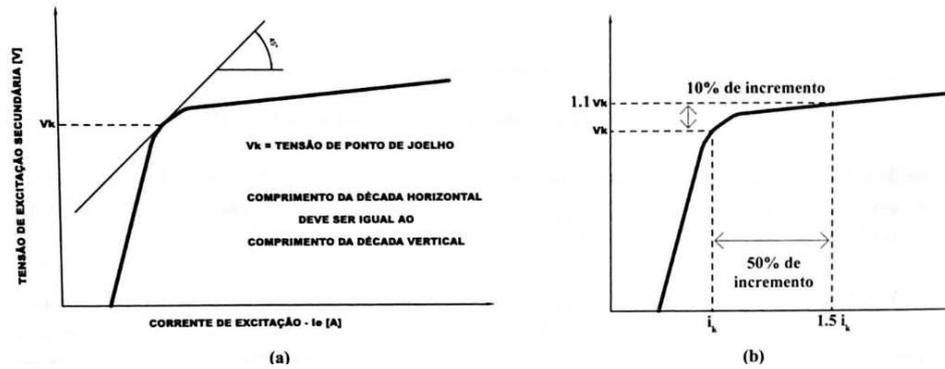
Fonte: IEEE (2001).

A corrente I_E representa o quanto de corrente é desviada para o ramo magnetizante, ou seja, esta corrente é que provoca o erro no TC (Mardegan, 2022). A impedância (reatância) do ramo magnetizante é normalmente elevada, da ordem de algumas centenas de Ohms. Assim, a corrente I_E , em condições normais, é muito pequena e pode ser desprezada. Entretanto, na região de saturação, a impedância do ramo magnetizante diminui e, portanto, aumenta a corrente desviada.

2.4. Tensão de joelho do TC de proteção

A tensão de joelho (Knee Point Voltage - V_k) apresenta duas definições pela norma segundo (IEEE, 2008): (a) Ponto sobre a curva de excitação secundária em que uma reta tangente a ela faz uma inclinação de 45° com o eixo das abcissas. A curva de excitação secundária deve ser plotada em escala bilogarítmica, cuja ordenadas e abcissas tenham o mesmo valor de década (década quadrada). (b) Tensão senoidal de frequência nominal aplicada aos terminais secundários de um TC com os demais enrolamentos abertos que, incrementada em 10%, provocará um aumento de 50% na corrente de excitação (Mardegan, 2022).

Figura 10 - Tensão de Ponto de Joelho V_k .



Fonte: Mardegan (2022).

2.5. Força eletromotriz secundária do TC

A força eletromotriz (f.e.m.) em um TC refere-se à tensão induzida no enrolamento secundário devido ao fluxo magnético variável produzido pela corrente primária. Segundo (Gangadharan et al., 2007), a força eletromotriz (f.e.m) interna máxima no secundário que pode ser gerada em um TC é dada pela equação (2).

$$V_{k \text{ máx}} = 4,44 \times B \times f \times n \times A \quad (2)$$

Sendo:

n: relação de transformação do TC;

B: densidade de fluxo no núcleo do TC;

f: frequência nominal do sistema;

A: área de seção transversal do núcleo do TC;

A tensão nos terminais secundários do TC depende da corrente que circula no secundário do TC e da carga conectada (burden). Para a operação livre de saturação, a força eletromotriz no ponto de joelho do TC (V_k) deve ser maior ou igual à maior tensão possível conectada nos terminais secundários (V_s) mais a queda de tensão dos enrolamentos $I_s R_{CT}$ do TC (Gangadharan et al., 2007).

$$V_{k \text{ máx}} \geq V_s + I_s R_{CT} \quad (3)$$

Da equação (2), pode-se verificar que V_k é proporcional a densidade de fluxo (B) e a área de seção transversal (A), sendo a frequência e a relação de transformação constantes do sistema. Portanto, para aumentar o valor V_k , a área de seção transversal do núcleo deve ser

aumentada ou a densidade de fluxo deve ser aumentada, selecionando um material apropriado. Em ambos os casos resulta em aumento de custos do TC. Assim, é necessário entender os fatores que contribuem para o dimensionamento da tensão V_k de forma adequada.

2.6. Máxima magnitude da corrente de curto-circuito assimétrica

A magnitude da componente CC de uma corrente de curto-circuito varia com o ângulo de incidência de falta e o ângulo da impedância de falta. A expressão geral para a corrente de curto-circuito em qualquer instante é definida pela equação (4) (WIJAYAPALA et al., 2016).

$$I_p = \frac{V\sqrt{2}}{Z} \left[\text{sen}(wt + \alpha - \varphi) - \text{sen}(\alpha - \varphi)e^{-\frac{t}{T_p}} \right] \quad (4)$$

Sendo:

I_p : valor instantâneo da corrente de falta;

$\frac{V\sqrt{2}}{Z}$: valor de pico de I_p ;

α : ângulo de incidência da falta da tensão;

φ : ângulo da impedância de falta;

T_p : constante de tempo primária do circuito;

w : frequência angular;

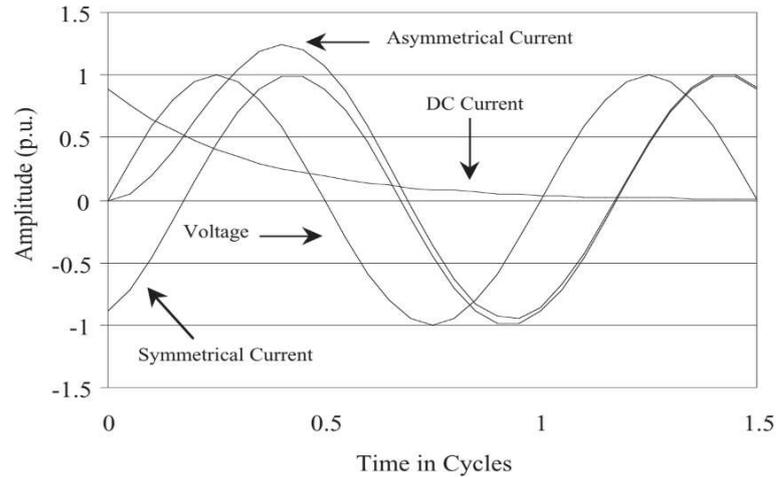
t : instante de tempo.

A magnitude da componente CC ($\text{sen}(\alpha - \varphi)e^{-\frac{t}{T_p}}$) varia com o ângulo $\alpha - \varphi$ que irá ser máximo quando o valor $(\alpha - \varphi) = \pm 90^\circ$. No caso de linhas de transmissões, valores típicos do ângulo de impedância de falta φ são altamente indutivos, próximos de 90° , devido à elevada relação X/R. Isso indica que no ângulo de incidência de falta α igual a zero ou próximo de zero, o valor da componente CC terá aproximadamente o valor máximo. Assim, o valor máximo da corrente de curto-circuito acontece no tempo $t = 0,5$ ciclos ($8,3ms$) em circuitos puramente indutivos de frequência 60 Hz. A equação (5) mostra a corrente de curto-circuito instantânea com o ângulo de incidência de falta α igual a zero e o ângulo de impedância de falta puramente indutivo (90°) (WIJAYAPALA et al., 2016, p. 50).

$$I_p = \frac{V\sqrt{2}}{Z} \left[e^{-\frac{t}{T_p}} - \cos wt \right] \quad (5)$$

Como os sistemas elétricos não são circuitos de reatância indutiva pura, as correntes de faltas estão atrasadas em relação às tensões aplicadas no ângulo φ ($\tan^{-1} X/R$), que é menor que 90° , ou seja, o pico da corrente de curto-circuito ocorre antes de meio ciclo, como ilustrado na Figura 11 (IEEE Std 551, 2006).

Figura 11 - Máximo valor de pico da corrente de curto-circuito assimétrica.



Fonte: IEEE Std 551 (2006).

Segundo a IEEE Std 551, um método para calcular o valor de pico da corrente de curto-circuito pode ser dividido em duas partes. Primeiro, calcula-se o tempo em ciclos da equação (6) e então, aplica-se a equação (7).

$$\tau = 0,49 - 0,1e^{-\frac{X/R}{3}} \quad (6)$$

$$I_p = \sqrt{2}I_{CA_rms} \left[1 + e^{-\frac{2\pi\tau}{(X/R)}} \right] \quad (7)$$

Sendo:

I_p : valor instantâneo da corrente de falta;

I_{CA_rms} : valor RMS da corrente de falta CA simétrica;

τ : tempo em ciclos para o máximo valor de corrente de falta;

X/R : relação entre a reatância indutiva (X) e a resistência (R) do ponto de falta;

O mesmo método pode ser aplicado para calcular os valores eficazes de corrente segundo a IEEE Std 551, resultando na equação (8).

$$I_{RMS} = I_{CA_rms} \sqrt{\left[1 + 2e^{-\frac{4\pi\tau}{(X/R)}}\right]} \quad (8)$$

2.7. Fatores de dimensionamento para especificação de TCs de proteção com desempenho transitório

Baseando-se nos requisitos de desempenho dos TCs em faltas assimétricas, a norma IEC 61869-2 mostra o equacionamento da força eletromotriz considerando fatores de dimensionamento tanto de regime permanente como transitório, considerando o tempo de atuação da proteção e o ciclo de operação do disjuntor (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2014). Os cálculos de dimensionamento do TC são baseados no fator transitório (K_{tf}) e no fator de dimensionamento transitório (K_{td}), como observado na equação abaixo.

$$E_{al} = K_{SSC} K_{tf} (R_B + R_{CT}) I_N \quad (9)$$

2.7.1. Fator de curto-circuito (K_{SSC})

Este fator leva em consideração a magnitude da corrente de curto-circuito simétrica do pior caso de falta. É dado pela razão entre a máxima corrente de curto-circuito simétrica primária ($I_{CC_MÁX}$) e a corrente nominal primária (I_p) do TC.

$$K_{SSC} = \frac{I_{CC_MÁX}}{I_p} \quad (10)$$

2.7.2. Fator de assimetria transitória (K_{TF})

A componente CC do curto-circuito irá causar um crescente fluxo magnético no núcleo do TC, dessa forma, caso o TC seja dimensionado somente pela corrente de curto-circuito simétrica, ele irá saturar na presença de correntes assimétricas (Gangadharan et al., 2007). O fator de assimetria transitória é dado pela relação entre o fluxo magnético secundário no TC devido a corrente de falta total e o fluxo magnético devido a componente de falta de corrente alternada (CA).

$$K_{TF} = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \cos\theta (e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}}) + \sin\theta e^{-\frac{t}{T_s}} - \sin(\omega t + \theta) \quad (11)$$

Sendo:

T_p : constante de tempo primária do sistema (L_1/R_1);

T_s : constante de tempo secundária do TC ($L_m/R_{CT} + R_B$);

θ : diferença entre o ângulo de incidência da falta e o ângulo da corrente de falta;

φ : ângulo da impedância de falta;

t : limite do tempo de precisão.

A constante de tempo primária (T_p) é definida como a razão entre L_1/R_1 do local da falta e determina o decaimento da componente CC do curto-circuito. Uma constante de tempo T_p muito alta, irá levar a um tempo muito alto de decaimento da componente CC em uma falta. O T_p gera um alto impacto no fluxo desenvolvimento do fluxo magnético no núcleo do TC, portanto exerce um papel fundamental para o dimensionamento do TC.

Segundo a norma IEC TR 61869-100, sabe-se que o máximo deslocamento na corrente de falta ocorre quando $\theta=0^\circ$, portanto o fator de dimensionamento transitório descrito na equação (12).

$$K_{TF}(\theta = 0^\circ) = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} (e^{\frac{-t}{T_p}} - e^{\frac{-t}{T_s}}) - \sin(\omega t) \quad (12)$$

Como pode ser visto na equação (12), o valor K_{TF} depende das constantes de tempo primária e secundária e do tempo de saturação desejado. Portanto, o valor de K_{TF} depende da quantidade de tempo requerida no estado não-saturado para que o relé de proteção atue corretamente. No caso de TCs dimensionados para que nunca saturem, a equação (12) pode ser simplificada, considerando que $T_s \gg T_p$, resultando em (13) (Gangadharan et al., 2007).

$$K_{TF}(\theta = 0^\circ) = \left(1 + \frac{X}{R}\right) \quad (13)$$

A equação (12) tem duas componentes, uma exponencial e outra senoidal. O termo “ $\sin(\omega t)$ ” se trocado por “-1” dará a envoltória da curva, que é uma boa aproximação para tempos de saturação acima de um ciclo. Para tempos de saturação menores, é necessário considerar a equação completa (Gangadharan et al., 2007).

Segundo a norma IEC TR 61869-100, o valor máximo de K_{TF} ocorre nos tempos de $t = t_{tfp,max}$ e $t = t_{tfdc,max}$ como pode ser observado nas equações (14) e (15) abaixo,

respectivamente. Além disso, o valor máximo da curva de K_{TF} corresponde aos valores de $K_{tfp,max}$ e $K_{tfp,dc,max}$ dado pelas equações (16) e (17), respectivamente.

$$t_{tfp,max} = \frac{T_p T_s}{T_p - T_s} \ln \left(\frac{\frac{T_p}{T_s} \cos \theta + \frac{T_s - T_p}{\omega T_s^2} \sin \theta}{\cos \theta} \right) \quad (14)$$

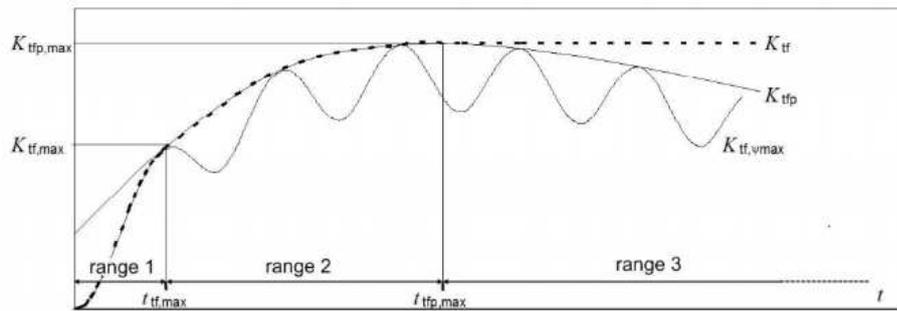
$$t_{tfp,dc,max} (\theta = 0^\circ) = \frac{T_p T_s}{T_p - T_s} \ln \left(\frac{T_p}{T_s} \right) \quad (15)$$

$$K_{tfp,max} = \left(\omega T_p \cos \theta + \frac{T_p + T_s}{T_s} \sin \theta \right) \left(\frac{\frac{T_p}{T_s} \cos \theta + \frac{T_s - T_p}{\omega T_s^2} \sin \theta}{\cos \theta} \right)^{\frac{T_p}{T_s - T_p}} + 1 \quad (16)$$

$$K_{tfp,dc,max} = \omega T_p \left(\frac{T_p}{T_s} \right)^{\frac{T_p}{T_s - T_p}} + 1 \quad (17)$$

A Figura 12 ilustra um resumo dos fatores de transitórios para todos os ângulos de incidência de falta ($K_{tf,\psi_{max}}$) de um TC e seus respectivos tempos.

Figura 12 - Faixas de tempo relevantes para o fator de transitório.



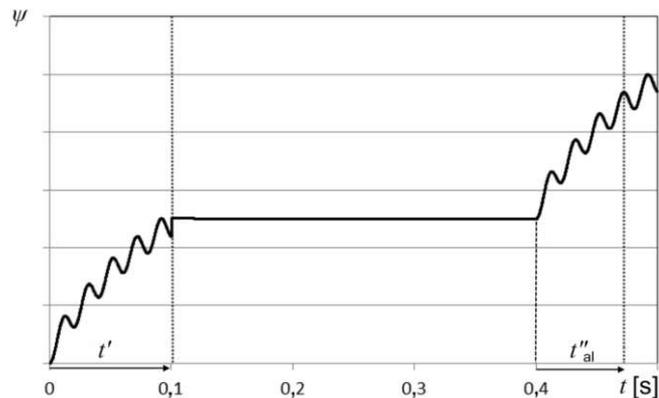
Fonte: IEC TR 61869-100 (2017).

As equações (11) e (12) são aplicáveis para fatores de dimensionamento transitórios considerando apenas uma falta. Entretanto, em linhas de transmissões são aplicados esquemas de religamentos automáticos, sendo a performance dos TCs durante os religamentos ainda mais crítica. Portanto, a margem para saturação durante o religamento é menor que na primeira falta (Gangadharan et al., 2007). Para TCs de núcleo sem “gap” (típico TPX) o fluxo decai muito pouco e a aproximação de pior caso é considerar o fluxo constante durante o “tempo morto” do

religamento. A Figura 13 ilustra um TC submetido a uma falta, considerando que não houve saturação durante o primeiro evento e que o fluxo residual foi mantido na pior condição possível da primeira falta. Na sequência, foi feito um religamento e o fluxo começa a crescer a partir daquele valor. Dessa forma, o fator de dimensionamento transitório quando o TC é submetido a um religamento deverá ser a soma do fator de cada ciclo, definido pela equação.

$$K_{td}(COCO) = K_{td}(t') + K_{td}(t'') \quad (18)$$

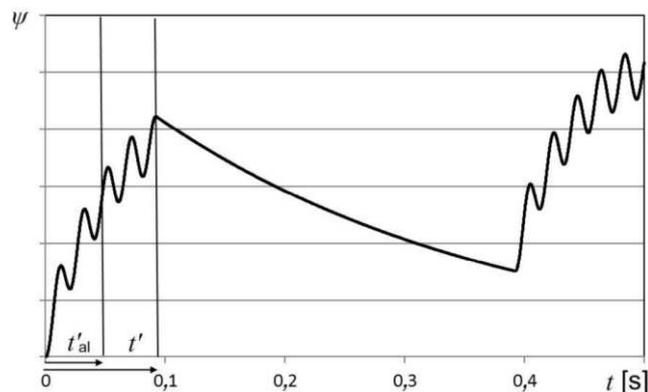
Figura 13 - Fluxo magnético do TC sem "gap" durante uma falta com religamento.



Fonte: IEC TR 61869-100 (2017).

Para TCs que tem “gap” e possuem uma baixa constante de tempo secundária (tipicamente dos tipos TPY e TPZ), o fluxo declina exponencialmente com a constante de tempo secundária durante o tempo morto da falta e podemos esperar um fluxo como ilustrado na Figura 14. Nesta figura, o ponto mais alto do fluxo magnético ocorre na segunda energização, entretanto, não ocorre saturação (fluxo magnético máximo) durante os ciclos de faltas.

Figura 14 - Fluxo magnético do TC com "gap" durante uma falta com religamento.



Fonte: IEC TR 61869-100 (2017).

A equação (19) mostra o fator de dimensionamento transitório quando a função de religamento é usada. O primeiro termo da exponencial na equação leva em consideração o decaimento do fluxo do TC durante o tempo morto do religamento automático. O fluxo decai a partir de um valor atingido durante a primeira falta.

$$K_{TF} = \left\{ \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t'}{T_p}} - e^{-\frac{t'}{T_s}} \right) - \sin(\omega t') \right\} e^{-\frac{(td+t''_{al})}{T_s}} + \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t''_{al}}{T_p}} - e^{-\frac{t''_{al}}{T_s}} \right) + 1 \quad (19)$$

Sendo:

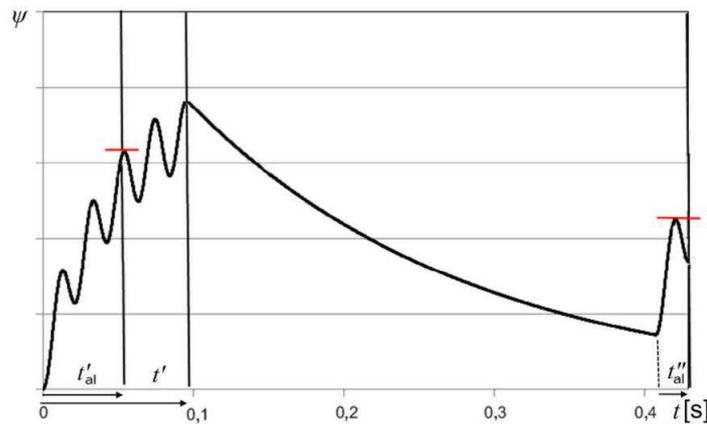
t' : duração da primeira falta

t''_{al} : limite do tempo de precisão da segunda falta (após o religamento)

td : tempo morto do religamento

Em alguns casos, é possível que o fluxo máximo ocorra durante a primeira falta, isso significa que o K_{TF} a ser considerado deve ser o valor máximo entre o primeiro ciclo de atuação da proteção (C-O) e o segundo ciclo de atuação da proteção (C-O-C-O).

Figura 15 - Fluxo magnético de um ciclo CO-CO com o maior fluxo na primeira energização.



Fonte: IEC TR 61869-100 (2017).

$$K_{td}(COCO) = \max \left\{ K_{td}(t'_{al}), K_{td}(t') e^{-\frac{(td+t''_{al})}{T_s}} + K_{td}(t''_{al}) \right\} \quad (20)$$

2.8. Tempo de referência para o ciclo de operação CO-CO

A determinação da tensão assimétrica imposta ao secundário (E_{al}) depende de vários fatores, dentre eles os tempos de atuação de proteção, de eliminação de falta e de tempo morto. A tabela abaixo pode ser usada com tempos mais conservadores de referência, de forma a automatizar o processo de cálculo da tensão imposta. Em caso de saturação do TC, é importante avaliar os tempos reais de eliminação de falta, para verificar, a partir de dados reais de operação dos relés e abertura de disjuntores dos respectivos fabricantes, a análise da superação do TC (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2014). Já o tempo morto de referência é adotado 500ms para religamentos tripolares e monopolares, conforme Submódulo 2.3 do ONS (2022).

Tabela 1 - Tempos de referência de eliminação de falta

Elemento	Nível de Tensão	Tempo máximo de eliminação: (t' de referência)
Linhas de Transmissão	750, 500, 440, 345 kV	100 ms
	230 e 138 kV (Rede Básica)	150 ms
Barramentos	Tensão igual ou superior a 345 kV	100 ms
	Tensão inferior a 345 kV	150 ms
Transformadores	750, 500, 440, 345 kV (Lado de Alta)	120 ms
	230 ou 138 kV (Lado de Alta)	150 ms

Fonte:(Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2014).

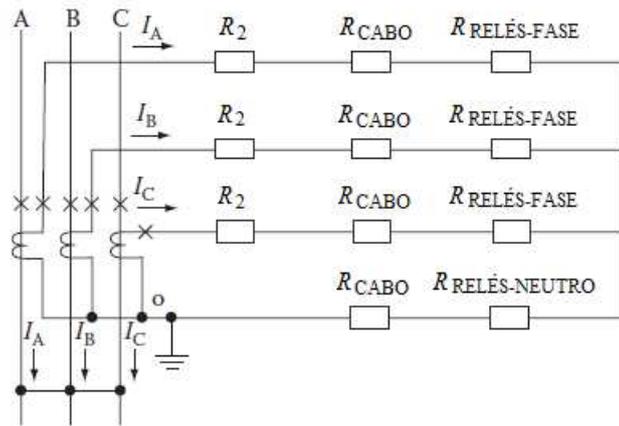
2.9. Identificação das cargas secundárias em função do tipo de falta

Segundo o (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2014), há duas alternativas para o valor de impedância de carga a ser adotado no cálculo da tensão imposta E_{al} . A primeira, e mais simples, corresponde ao uso direto da carga nominal do TC. Caso ocorra a saturação do TC, é necessário utilizar uma segunda alternativa, onde se representa a impedância secundária considerando o somatório das cargas dos relés. O levantamento de cargas do TC depende do tipo de conexão dos TCs, bem como do tipo de falta que será estudado.

A Figura 16 ilustra a distribuição das cargas secundárias para uma falta trifásica, considerando o sistema equilibrado, e a impedância de carga do TC é calculada conforme mostrado na equação (21).

$$Z_{b_{nominal}} = R_{cabo} + \sum Z_{relés-fase} \tag{21}$$

Figura 16 - Levantamento das cargas secundárias para falta trifásica.

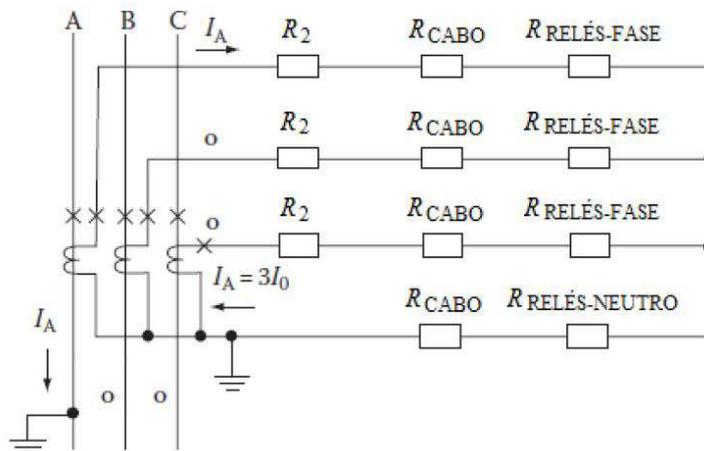


Fonte: (Rodrigues, 2016).

A Figura 17 ilustra a distribuição das cargas secundárias para uma falta monofásica, a impedância de cargas do TC deve considerar as impedâncias relacionadas ao neutro (relés e cabo de neutro), conforme equação (22).

$$Z_{b_{nominal}} = 2R_{cabo} + \sum Z_{relés-fase} + \sum Z_{relés-neutro} \tag{22}$$

Figura 17 - Levantamento de cargas secundária para falta monofásica.

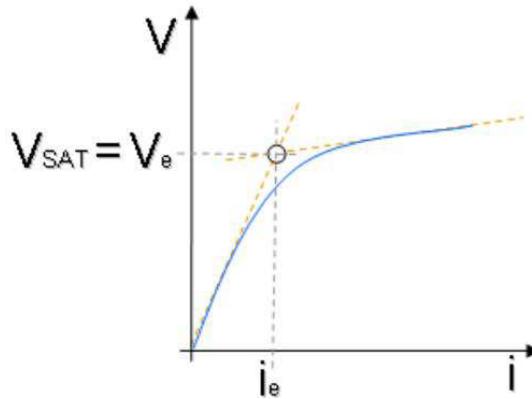


Fonte: Rodrigues (2016).

2.10. Constante de tempo secundária

Para o cálculo da indutância de magnetização (L_m) e constante de tempo secundária (T_s), foi seguido o procedimento da IEC para definir o ponto de joelho na curva de excitação. Dessa forma, os valores de tensão e corrente V_e e I_e são determinados analiticamente, utilizando o mesmo ponto de joelho da tensão como referência para a tensão de saturação. Os pontos de tensão e corrente V_e e I_e são retirados da região linear da curva de excitação do TC.

Figura 18 - Determinação do ponto V_e e I_e para o cálculo de L_m .



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (2014).

A indutância de magnetização L_m é calculada da seguinte forma:

$$L_m = \frac{V_e}{I_e \times \omega} \quad (23)$$

Por sua vez, a constante de tempo secundária é calculada, de forma genérica, conforme a expressão:

$$T_s = \frac{L_m + L_b}{R_{b_{nominal}} + R_{tc}} \quad (24)$$

Sendo:

$R_{b_{nominal}}$: é o somatório das resistências nominais dos relés somada à resistência dos cabos;

L_b : Indutância da carga

R_{tc} : resistência dos enrolamentos secundários

A indutância da carga (L_b) pode ser desprezada frente à indutância de magnetização do TC (L_m). Além disso, analogamente ao descrito na seção anterior, T_s é calculada com base na carga nominal do TC, ou seja, o levantamento do somatório das resistências para a determinação de $R_{b_{nominal}}$ deve considerar o tipo de falta.

2.11. Considerações finais

Este capítulo teve como objetivo fundamentar os conceitos teóricos essenciais sobre transformadores de corrente (TCs) de proteção, abordando as normas relevantes e os fatores que influenciam o desempenho desses dispositivos, como o *burden*, o fator de sobrecorrente, a força eletromotriz (F.E.M.), entre outros.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo tem como objetivo analisar a saturação dos transformadores de corrente (TCs) conectado ao Sistema Interligado Nacional (SIN). A saturação pode impactar a precisão dos TCs e, conseqüentemente, o desempenho dos sistemas de proteção.

3.1. Etapas para desenvolvimento do trabalho

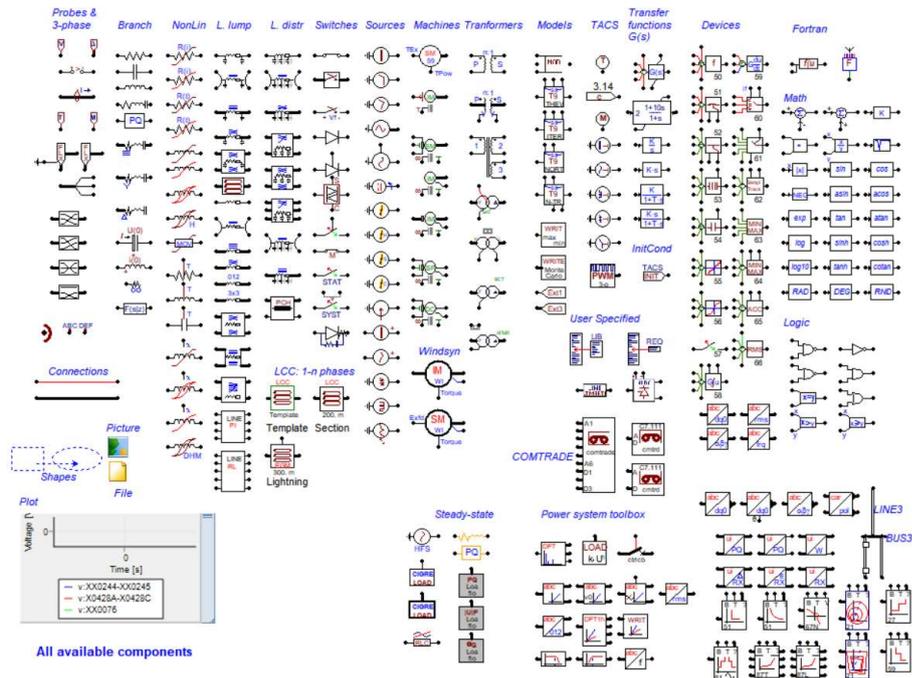
A metodologia para desenvolvimento deste trabalho abrange:

- Modelagem do sistema elétrico;
- Cálculos analíticos da força eletromotriz;
- Simulações de curto-circuito, verificação da saturação e comparação com os resultados obtidos dos cálculos;

3.2. O ATPDraw

O ATP (Alternative Transients Program) é um software amplamente utilizado para a simulação de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética em sistemas de potência. Este programa permite a modelagem detalhada de componentes elétricos e a análise do comportamento do sistema sob diferentes condições operacionais, como curto-circuitos e falhas. O ATPDraw, que consiste em uma interface gráfica do ATP, foi empregado para facilitar a construção dos modelos e a visualização dos resultados. Através do ATPDraw foram modelados o transformador de corrente em um sistema elétrico simplificado, permitindo a execução de simulações que refletem as condições reais de operação da usina. Além disso, o ATP conta com uma linguagem de programação integrada chamada MODELS que permite aos usuários criarem modelos personalizados de dispositivos ou sistemas elétricos que não estão diretamente disponíveis na biblioteca padrão do software, permitindo a implementação de blocos com comportamento genérico, conferindo maior flexibilidade à simulação (LOURENÇO, 2018). A Figura 19 apresenta os componentes disponíveis no ATPDraw.

Figura 19 - Componentes do ATPDraw.



Fonte: Captura de tela do ATPDraw.

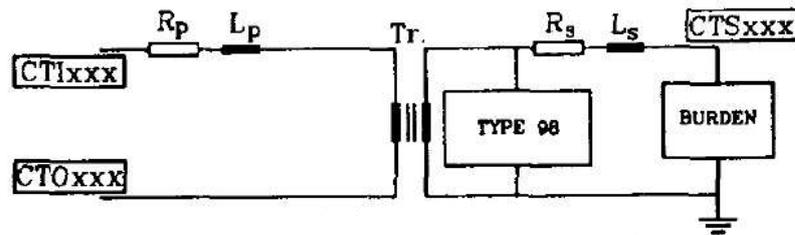
No contexto deste trabalho, o ATP foi utilizado para simular um sistema elétrico simplificado para analisar a saturação dos transformadores de corrente durante eventos curto-circuito. A simulação desses fenômenos permite uma avaliação precisa do desempenho dos TCs, considerando os efeitos da saturação do núcleo magnético em condições de curtos-circuitos. A combinação de cálculos analíticos e simulações no ATP é essencial para verificar a adequação dos TCs aos requisitos normativos e operacionais, assegurando que os transformadores mantenham sua precisão e confiabilidade, mesmo em situações adversas. Além disso, a linguagem MODELS foi utilizada para calcular os valores em RMS (Root Mean Square) da corrente ideal e da corrente real do secundário do TC, para a análise da perda de precisão do TC em condições de saturação durante eventos de curto-circuito.

3.3. Modelo do Transformador de Corrente proposto

Um TC pode ser modelado de várias maneiras no ATP, uma delas é utilizando um transformador saturável (Egorova, 2011). Outra forma, segundo Kezunovic et al., 1994, seria modelagem por meio de dois componentes, um transformador ideal (TRAFO_I) e um indutor não linear tipo 98 (NLIND), sendo este para simular o ramo de magnetização do transformador de corrente. Já que as características V-I estão disponíveis para o lado secundário de um TC, o

modelo do indutor não linear Tipo-98 pode então ser conectado aos terminais secundários deste transformador e a impedância secundária real (R_s , L_s) pode ser anexada aos terminais secundários conforme mostrado na Figura 20 (Kezunovic et al., 1994). Para a modelagem do TC neste trabalho, a impedância do enrolamento primário do TC da Figura 20 será desprezada, conforme já explicado na Seção 2.2.1.

Figura 20 - Modelo do TC.



Fonte: Kezunovic et al. (1994).

Os dados de entrada do ramo magnetizante (representado pelo elemento 98) para mostrar as características de saturação podem ser obtidos da curva de excitação característica do TC, cujos valores são normalmente obtidos do ensaio $V \times i$, entretanto para o ATP é necessário entrar com os valores $\phi \times i$ utilizando a rotina auxiliar SATURATION, conforme seção XIXG do rulebook.

O circuito de teste utilizado para o estudo do TC é dado pela Figura 21. Os parâmetros do R e L desta figura correspondem à resistência e à indutância (reatância indutiva em corrente alternada) e são selecionados para produzir a mesma relação X/R no ponto de falta. No instante da falta, a chave “SW1”, do ramo de carga “LOAD”, abre enquanto a chave “SW2” fecha, simulando um curto-circuito da fonte de tensão “E”, com o ângulo de incidência da falta controlado pela chave “SW2”. Assim, a corrente secundária do transformador de corrente, representado por “CT”, com seus terminais secundários conectados a uma carga “Zb”, pode ser analisada quanto ao nível de saturação.

Para os cálculos das correntes de curto-circuito foi considerado a configuração de rede correspondente ao ano de entrada do empreendimento, bem como a contribuição da usina fotovoltaica no barramento da SE, e pode ser resumida na tabela abaixo.

Tabela 2 - Dados de curto-circuito e X/R da SE coletora.

Subestação	Tensão (kV)	Curto-circuito Trifásico		Curto-circuito Monofásico	
		kA	X/R	kA	X/R
SE Coletora	500	16,87	13,90	12,95	9,67

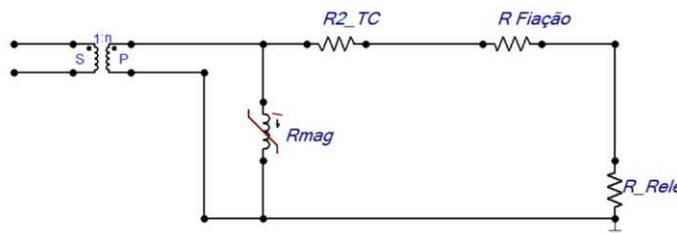
Fonte: o próprio autor.

Os TCs escolhidos para a subestação são de classe TPY, conforme as diretrizes da norma IEC 61869-2, devido ao seu baixo fator de remanência e ao desempenho superior durante faltas assimétricas. Essas características garantem maior confiabilidade em condições adversas de operação.

3.5. Modelagem do TC no ATPDraw

Foi criado um modelo de TC no ATP próximo de um TC real, como mostra a Figura 23. Assim, será possível analisar o desempenho do TC a partir da corrente secundária que percorre as cargas conectadas entre seus terminais. Devido ao objetivo desse estudo, foi possível fazer algumas simplificações, como desprezar a queda de tensão dos enrolamentos primários (praticamente desprezíveis) e as reatâncias do lado secundário foram omitidas por se tratar de simulações com relés numéricos, devido aos relés não possuírem reatâncias, além da reatância da fiação ser desprezível.

Figura 23 - Modelo do TC no ATP com indutor não linear *Type 98*.



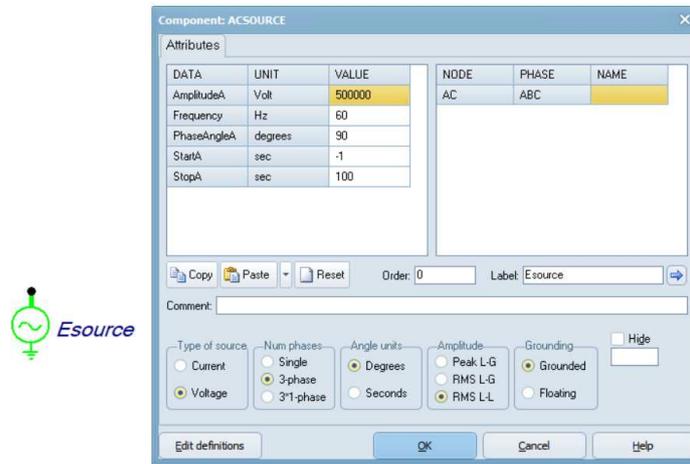
Fonte: o próprio autor.

3.6. Modelagem dos componentes no ATPDraw do sistema elétrico em estudo

3.6.1. Fonte de tensão

O modelo da fonte trifásica foi o ACSOURCE, que é uma fonte de tensão com magnitude entre fases de 500kV aterrada sem impedância e frequência do sistema de 60Hz. Como o modelo é uma fonte cossenoidal, a tensão foi transformada em senoidal, aplicando um ângulo de 90° na fase A, de forma que a componente DC da corrente de curto-circuito assimétrica seja positiva.

Figura 24 - Dados de entrada da fonte utilizada.



Fonte: o próprio autor.

3.6.2. Impedância reduzida na barra e curto-circuito

Para a modelagem da impedância reduzida no ponto de curto-circuito, foi definido o modelo da linha como o LINERL3S, modelo de parâmetros concentrados e circuito RL simétrico em que foi adicionado as impedâncias de sequência positiva e zero. Dessa forma, foram calculados a impedância de sequência do sistema com base nos curtos-circuitos trifásico e monofásico da Tabela 2. Além disso, como pode ser observado na Figura 25 - Modelo de linha utilizado, os valores de impedância de sequência positiva e zero são em Ohm/m, sendo adicionado uma distância de 1 m, de forma a manter os valores de impedância em Ohm sem nenhuma divisão. É necessário modificar o parâmetro de indutância colocando o valor de X_{opt} igual a frequência da rede utilizada, para que o parâmetro padrão de indutância seja dado em Ohm/m e não em mH/m. As impedâncias de sequência positiva e zero podem ser calculadas a

partir das correntes de curtos-circuitos dada na Tabela 2 conforme fórmulas (25) e (26) (Mardegan, 2022).

$$Z_1 = \frac{V}{I_{cc3\phi}} \angle \theta = \tan^{-1}(X/R) \quad (25)$$

$$Z_0 = \frac{3xV}{I_{cc1\phi}} \angle \theta = \tan^{-1}(X/R) - 2Z_1 \quad (26)$$

3.6.2.1. Barramento da SE COLETORA

Para modelar o curto-circuito trifásico na barra da SE coletora, foram calculados os parâmetros de sequência positiva R e X conforme equação (25).

$$Z_1 = \frac{500/\sqrt{3} \text{ kV}}{16,87 \text{ kA}} \angle 85,88^\circ$$

$$Z_1 = 17,112 \Omega \angle 85,88^\circ$$

$$Z_1 = 1,2294 + j17,0678$$

$$R_1 = 1,2294 \text{ Ohms}$$

$$X_1 = 17,0678 \text{ Ohms}$$

Já a impedância de sequência zero R e X podem ser calculadas conforme equação (26).

$$Z_0 = \frac{3x500}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ - 2x 17,112 \angle 85,88^\circ$$

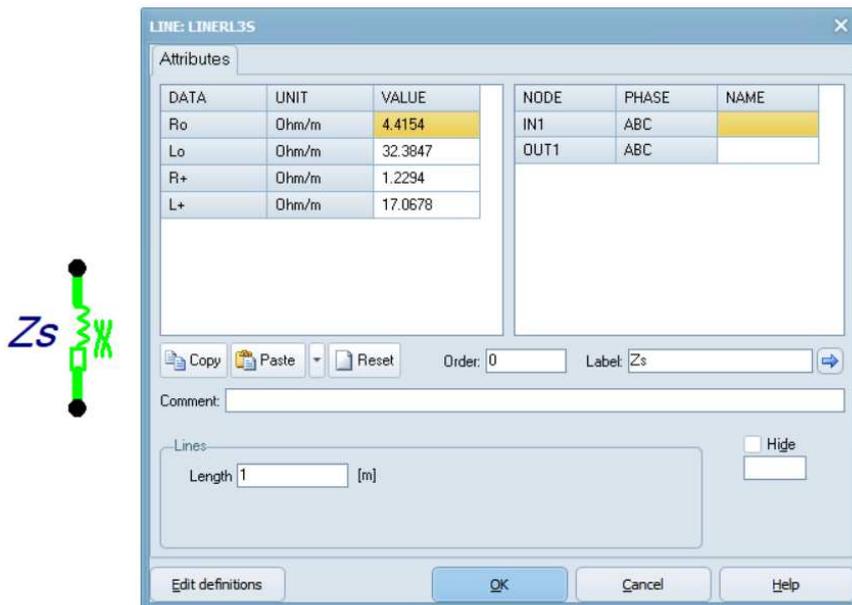
$$Z_0 = (6,8742 + j66,5203) - 2(1,2294 + j17,0678)$$

$$Z_0 = 4,4154 + j32,3847$$

$$R_0 = 4,4154 \text{ Ohms}$$

$$X_0 = 32,3847 \text{ Ohms}$$

Figura 25 - Modelo de linha utilizado e parâmetros elétricos da SE coletora.



Fonte: o próprio autor.

3.6.3. Cálculo do tempo de incidência de curto-circuito sem religamento

3.6.3.1. Barramento da SE COLETORA

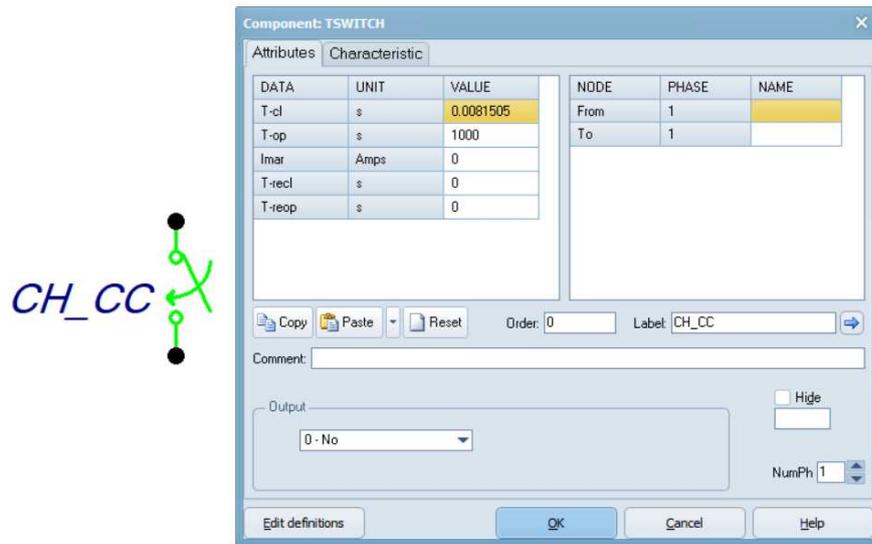
Para o caso de curto-circuito sem religamento, foi considerado a falta trifásica e o instante da falta de maior componente DC. O cálculo do tempo em ciclos do maior valor de pico de curto-circuito trifásico pode ser calculado pela equação (6) e repetida logo abaixo.

$$\tau = 0,49 - 0,1e^{-\frac{13,9}{3}} = 0,48903 \text{ ciclos}$$

Para simular a condição de pior caso de corrente de curto-circuito, foi imposto o tempo de fechamento das chaves TSWITCH no ATP multiplicando o tempo em ciclos com o período para obter o tempo de fechamento em segundos, conforme o calculado abaixo.

$$\tau (s) = 0,48903 * (1/60) = 0,0081505 \text{ s}$$

Figura 26 - Dados de entrada da chave utilizada para faltas sem religamento.



Fonte: o próprio autor.

3.7. Tempo mínimo requerido para não saturação do TC

Com base nos manuais do fabricante do relé, para o lado de alta tensão de 500kV, o tempo necessário para o relé processar as funções de proteção adotada é apresentado na tabela abaixo.

Tabela 3 - Tempo requerido pelos relés de proteção.

Tipo do Relé	Tempo [ms]
Proteção de sobrecorrente	17

Fonte: o próprio autor.

3.8. Cálculo do K_{SSC} , RTC e resistência interna do TC

A corrente nominal do circuito será calculada por meio da potência nominal do transformador de 400MVA. Será considerado um fator térmico do TC típico de 1,2. Para o critério de correntes nominais a corrente nominal primária deverá ser, no mínimo:

- 500 kV - $I_{n_AT} = S_n / (V_n \times \sqrt{3}) = 400000 / (500 \times \sqrt{3}) = 462 \text{ A} \rightarrow 462/1,2 = 385 \text{ A}$

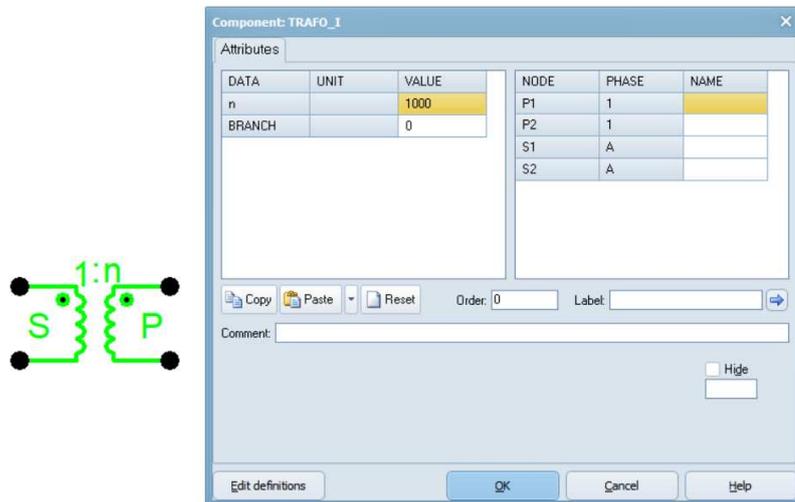
Para fins didáticos, a corrente nominal primária do TC será de 1000 A e a relação de transformação é de 1000:1. Para esse valor, o K_{SSC} , definido conforme equação (10), o curto-circuito trifásico e monofásico é:

$$K_{SSC_{3f}} = \frac{I_{CC-3f}}{I_{PTC}} = \frac{16870}{1000} = 16,87$$

$$K_{SSC_{1f}} = \frac{I_{CC-1f}}{I_{PTC}} = \frac{12950}{1000} = 12,95$$

Foi escolhido um transformador ideal para representar a relação de transformação do transformador de corrente, sendo invertido os terminais primários e secundários para poder representar a quantidade de enrolamentos no terminal secundário. O TC possui uma relação de transformação de 1000:1, portanto foi colocado um valor de 1000 na relação de transformação, como pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 - Relação de transformação do TC no componente TRAF0_I do ATPdraw.



Fonte: o próprio autor.

Segundo Mardegan, 2022, deve ser utilizado os dados recebidos pelo fabricante. Na falta de dados, a impedância do TC pode ser utilizado o valor abaixo para TCs com elevada relação.

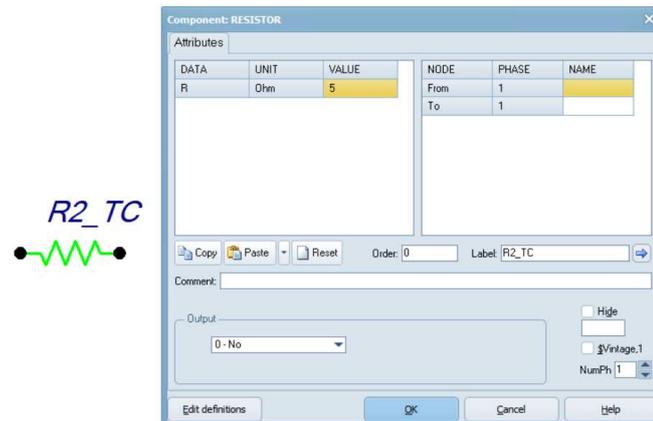
$$Z_2 = 0,005 \text{ ohm/espira}$$

Neste caso, a impedância total é equivalente a resistência, sendo desconsiderado qualquer reatância. Logo, a resistência total considerando a relação de transformação do TC 1000:1A pode ser calculada conforme abaixo.

$$R_2 = 0,005 \times RTC = 5 \text{ ohms}$$

A resistência interna do TC foi adicionada no componente RESISTOR do ATPDraw como pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - Resistência interna dos enrolamentos do TC.



Fonte: o próprio autor.

3.9. Levantamento de cargas do secundário do TC

Para o levantamento da carga do secundário do TC conectados aos relés de proteção, considerou-se a equação (21) para o curto-circuito trifásico e a equação (22) para o curto-circuito monofásico. As informações de impedâncias de cabos e dos relés foram obtidas diretamente dos fabricantes.

Tabela 4 - Levantamento de cargas do TC.

TC 500KV- TPY- (Maior distância, pior caso)	
Cabo de conexão TC - Caixa	
Bitola(mm ²)	6
Distância(m)	20
Impedância (Ω) – Icc3f	0,143
Impedância (Ω) – Icc1f (2xZ _{cabos})	0,286
Cabo de conexão Caixa - Painei	
Bitola(mm ²)	6
Distância(m)	120
Impedância (Ω) – Icc3f	0,858
Impedância (Ω) – Icc1f (2xZ _{cabos})	1,716
Cabo de conexão Painei - IED	
Bitola(mm ²)	2,5
Distância(m)	2
Impedância (Ω) – Icc3f	0,03
Impedância (Ω) – Icc1f (2xZ _{cabos})	0,06
Cargas Terminais (Ω)	
Unidade de proteção - Fase	0,100
Unidade de proteção - Neutro	0,100
Oscilógrafo	0,100
Carga total (VA) - Icc3f	1,23
Carga total (VA) – Icc1f	2,36

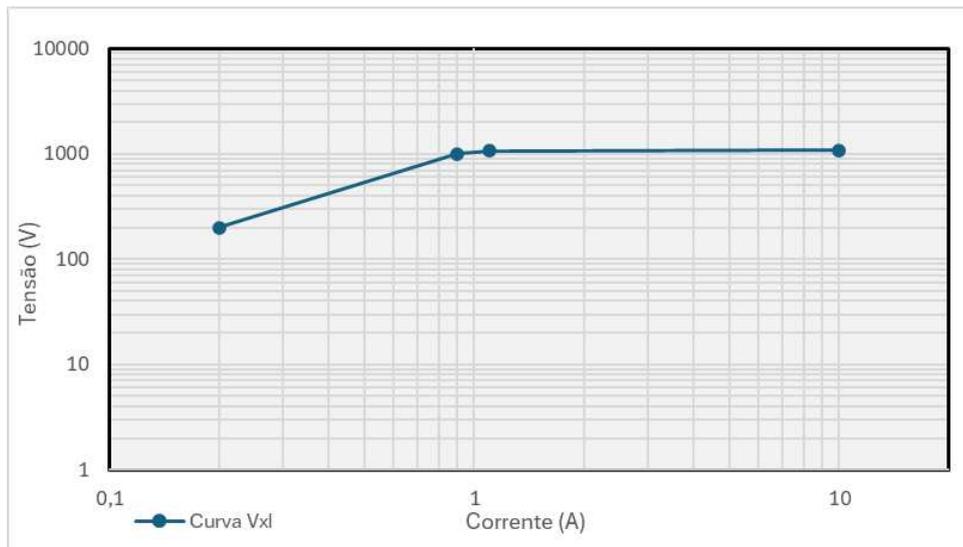
Fonte: o próprio autor.

O levantamento de cargas do secundário do TC deve ser realizado para o cálculo da força eletromotriz máxima do TC, bem como também é importante na comparação carga nominal do TC com a carga calculada, ou seja, a carga nominal especificada no TC deve ser maior que a carga calculada.

3.10. Curva de saturação do TC e constante secundária do sistema

A curva de saturação do TC foi obtida previamente com o fabricante, a fim de verificar se a mesma atende aos requisitos de cálculos da força eletromotriz, e é apresentada na Figura 29. A análise mostra que o ponto de joelho é, aproximadamente, no ponto onde a tensão é de 1050V e a corrente é de 1 A.

Figura 29 - Curva de saturação do TC.



Fonte: o próprio autor.

O cálculo da indutância de magnetização (L_m) e constante de tempo secundária (T_s) foi feito com base nas cargas secundárias de um curto-circuito trifásico e monofásico conforme abaixo.

$$L_m = \frac{V_e}{I_e \times \omega} = \frac{1050}{1 \times 2\pi \times 60} = 2,7852 \text{ H}$$

$$T_{s-icc3f} = \frac{L_m}{R_b + R_{ct}} = \frac{2,7852}{5 + 1,23} = 0,4470$$

$$T_{s-icc1f} = \frac{L_m}{R_b + R_{ct}} = \frac{2,7852}{5 + 2,36} = 0,3784$$

3.11. Verificação analítica da força eletromotriz E_{al} para faltas trifásicas e monofásicas

Para a análise da saturação dos TCs a partir dos curtos-circuitos do barramento da SE coletora apresentados na Tabela 2, serão calculados os fatores de dimensionamentos, conforme a norma IEC 61869-2 e de acordo com os dados do sistema apresentados na Tabela 5, para cada condição de curto-circuito (trifásico e monofásico), bem como para cada ciclo de operação da proteção (C-O e C-O-C-O).

Tabela 5 - Dados do sistema para especificação do TC.

Constante de Tempo Primária do TC		Constante de Tempo Secundária do TC		Dados do Sistema				
$T_P (3\phi)$	$T_P (1\phi)$	$T_S (3\phi)$	$T_S (1\phi)$	t'	t'_{al}	t''_{al}	$t_{fr} (3\phi)$	$t_{fr} (1\phi)$
0,0368 s	0,0256 s	0,4470 s	0,3784 s	0,100 s	0,017 s	0,017 s	0,500 s	0,500 s

Fonte: o próprio autor.

Para que o TC não sature durante o tempo estipulado de limite da precisão t'_{al} e t''_{al} , a força eletromotriz imposta ao secundário do TC, dada pela equação (9), não deverá ultrapassar a tensão de Joelho do TC ($E_{al} \leq 1050 V$), sendo esta utilizada como referência para a tensão de saturação.

Assim, foram calculados o fator de dimensionamento transitório, bem como utilizado os fatores de curto-circuito simétrico obtidos na Seção 3.8 e as resistências obtidas na Seção 3.9 para calcular os valores de força eletromotriz para a falta trifásica tipo C-O, monofásica tipo C-O, trifásica tipo C-O-C-O e monofásica tipo C-O-C-O, respectivamente.

- Faltas trifásicas – ciclo CO:

$$K_{TF_{3f}} = \frac{\omega T_P T_S}{T_P - T_S} \left(e^{\frac{-t'_{al}}{T_P}} - e^{\frac{-t'_{al}}{T_S}} \right) + 1$$

$$K_{TF_{3f}} = \frac{376,99 \times 0,0368 \times 0,4470}{0,0368 - 0,4470} \left(e^{\frac{-0,017}{0,0368}} - e^{\frac{-0,017}{0,4470}} \right) + 1 = 6,02$$

$$E_{al} = 16,87 \times 6,02 \times 1 \times (1,23 + 5) = \mathbf{632,70 V}$$

$$(E_{al} = \mathbf{632,70 V}) < (V_k = \mathbf{1050 V})$$

- Faltas monofásicas – ciclo CO:

$$K_{TF_{1f}} = \frac{376,99 \times 0,0256 \times 0,3784}{0,0256 - 0,3784} \left(e^{\frac{-0,017}{0,0256}} - e^{\frac{-0,017}{0,3784}} \right) + 1 = 5,61$$

$$E_{al} = 12,95 \times 5,61 \times 1 \times (2,36 + 5) = \mathbf{534,70 V}$$

$$(E_{al} = \mathbf{534,70 V}) < (V_k = \mathbf{1050 V})$$

- Faltas trifásicas – ciclo CO-CO:

$$K_{TF} = \left\{ \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{\frac{-t'}{T_p}} - e^{\frac{-t'}{T_s}} \right) - \sin(\omega t') \right\} e^{\frac{-(td+t''_{al})}{T_s}} + \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{\frac{-t''_{al}}{T_p}} - e^{\frac{-t''_{al}}{T_s}} \right) + 1 \quad (27)$$

$$K_{TF} = \left\{ \frac{376,99 \times 0,0368 \times 0,4470}{0,0368 - 0,4470} \left(e^{\frac{-0,100}{0,0368}} - e^{\frac{-0,100}{0,4470}} \right) - \sin(376,99 \times 0,1) \right\} e^{\frac{-(0,5+0,017)}{0,4470}} + \frac{376,99 \times 0,0368 \times 0,4470}{0,0368 - 0,4470} \left(e^{\frac{-0,017}{0,0368}} - e^{\frac{-0,017}{0,4470}} \right) + 1 = 9,51$$

$$E_{al} = 16,87 \times 9,51 \times 1 \times (1,23 + 5) = \mathbf{999,50 V}$$

$$(E_{al} = \mathbf{999,50 V}) < (V_k = \mathbf{1050 V})$$

- Faltas monofásicas – ciclo CO-CO:

$$K_{TF} = \left\{ \frac{376,99 \times 0,0256 \times 0,3784}{0,0256 - 0,3784} \left(e^{\frac{-0,100}{0,0256}} - e^{\frac{-0,100}{0,3784}} \right) - \sin(376,99 \times 0,1) \right\} e^{\frac{-(0,5+0,017)}{0,3784}} + \frac{376,99 \times 0,0256 \times 0,3784}{0,0256 - 0,3784} \left(e^{\frac{-0,017}{0,0256}} - e^{\frac{-0,017}{0,3784}} \right) + 1 = 7,98$$

$$E_{al} = 12,95 \times 7,98 \times 1 \times (2,36 + 5) = \mathbf{760,58 V}$$

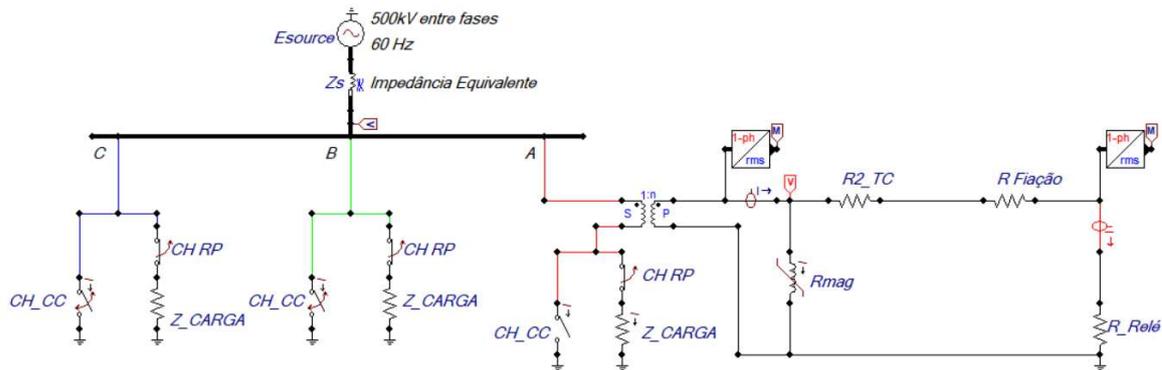
$$(E_{al} = \mathbf{760,58 V}) < (V_k = \mathbf{1050 V})$$

Verifica-se pelos cálculos analíticos de força eletromotriz que o TC não é superado para nenhuma das faltas trifásica e monofásica considerando o ciclo sem religamento (C-O) e o ciclo com religamento (C-O-C-O). Neste caso, espera-se que o TC não entre em saturação durante o tempo estipulado como limite da precisão apresentado na Tabela 5.

4. ESTUDO DE SATURAÇÃO NO ATPDRAW

Para analisar a resposta do TC durante o estudo de saturação, foi criado um sistema elétrico simplificado no ATPDraw a partir da modelagem dos componentes descritos nas seções 3.3, 3.43.5, 3.6 e 3.8, com a impedância equivalente calculada para ser fornecido os valores de curtos-circuitos da Tabela 2, como pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 - Sistema elétrico utilizado para estudo de saturação.



Fonte: o próprio autor.

Neste sistema, a fonte trifásica gera uma tensão de 500kV entre fases e as componentes “Z_CARGA” modelam as cargas das fases A, B e C.

4.1. Curva de saturação do indutor no ATPDraw

Para a adição da curva de saturação no modelo do indutor não-linear, foi utilizado a rotina auxiliar *saturation* do ATP para transformar os valores de tensão e corrente rms, obtidas da curva de saturação da Figura 29, em valores do tipo fluxo e corrente ($\phi \times i$). Assim, utilizou-se o ATP Launcher para rodar a rotina *saturation*, como observado na Figura 31.

Figura 31 – Arquivo de entrada da rotina *Saturation*.

```

C CT SECONDARY SATURATION CURVE
C CT RATIO: 1000-1A - Ea1 1050 V
BEGIN NEW DATA CASE
SATURATION
$ERASE
C      10      20      30      40      50      60      70      80
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C _FREQ><V-BASE><S-BASE><I-PUCH><K-THIRD
   60.0  1.0E-3  1.0E-6   0   0
C IRMS  pu  >< VRMS  pu  >
   2.00E-01  2.00E+02
   9.00E-01  1.00E+03
   1.10E+00  1.07E+03
   1.00E+01  1.08E+03
9999
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE

```

Fonte: o próprio autor.

A Figura 32 apresenta o arquivo de saída tipo *punch* (.pch) da rotina *saturation*, em que mostra os valores inseridos de entrada de corrente e tensão rms, respectivamente, em forma de comentário (onde há a linha “C”) e logo abaixo os valores convertidos pela rotina de corrente e fluxo, respectivamente. Assim, os valores de saída podem ser adicionados nas características do indutor não-linear e a curva de saturação inserida no ATPDraw pode ser visualizada na Figura 33.

Figura 32 - Arquivo de saída com valores de fluxo e corrente ($i \times \phi$).

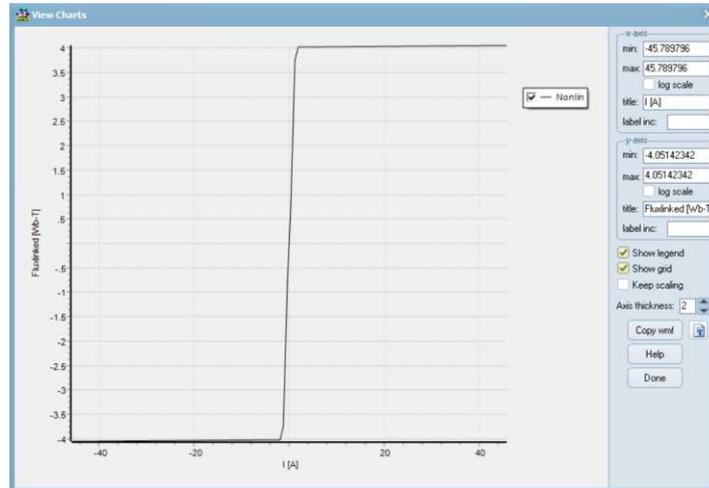
```

C <++++> Cards punched by support routine on 11-Nov-18 11.00.00 <++++>
C SATURATION
C $ERASE
C      60.0  1.0E-3  1.0E-6   0   0
C      2.00E-01  2.00E+02
C      9.00E-01  1.00E+03
C      1.10E+00  1.07E+03
C      1.00E+01  1.08E+03
C      9999
C      2.82842712E-01  7.50263597E-01
C      1.26263217E+00  3.75131798E+00
C      1.94266243E+00  4.01391024E+00
C      4.57897960E+01  4.05142342E+00
C      9999

```

Fonte: o próprio autor.

Figura 33 - Curva de saturação do modelo do indutor não linear tipo 98 no ATPdraw.



Fonte: o próprio autor.

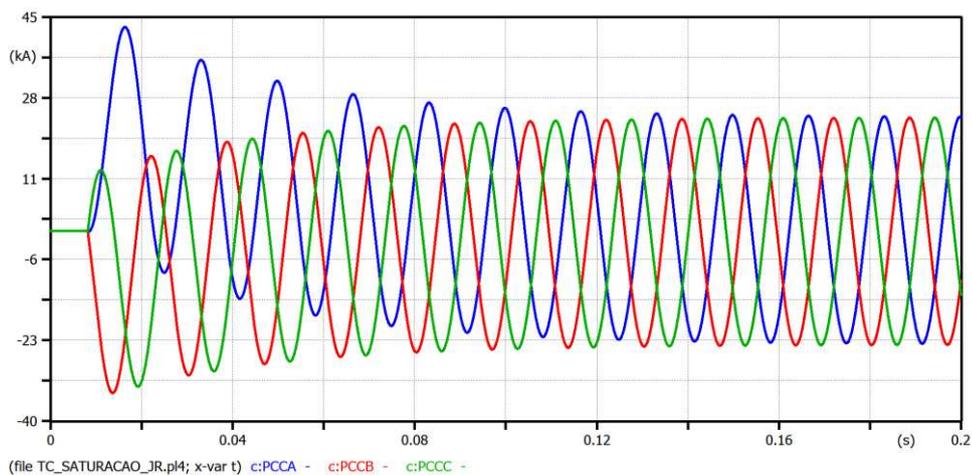
4.2. Simulação de faltas sem religamento (C-O)

O valor de pico da corrente de curto-circuito na condição de pior caso pode ser calculado pela equação abaixo, utilizando o tempo em ciclos calculado anteriormente.

$$I_{p_3\phi} = \sqrt{2} \times 16,87 \left[1 + e^{-\frac{2\pi \times 0,48903}{(13,90)}} \right] = 42,98 \text{ kA}$$

As formas de ondas do curto-circuito trifásico são mostradas na Figura 34 - Forma de onda do curto-circuito trifásico, sendo a fase A que tem o maior pico de corrente, devido ao chaveamento da fase A acontecer no pior caso em que há um maior nível DC da forma de onda.

Figura 34 - Forma de onda do curto-circuito trifásico.

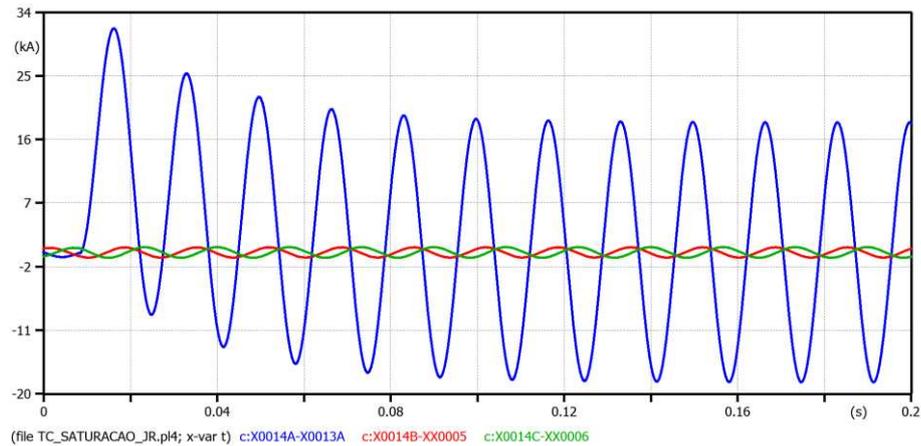


Fonte: o próprio autor.

Por simplificação, será usado o mesmo tempo em ciclos do curto-circuito trifásico para calcular o valor de pico do curto-circuito monofásico, conforme mostrado na Figura 35.

$$I_{p_{1\phi}} = \sqrt{2} \times 12,95 \left[1 + e^{-\frac{2\pi \times 0,48903}{(9,67)}} \right] = 31,64 \text{ kA}$$

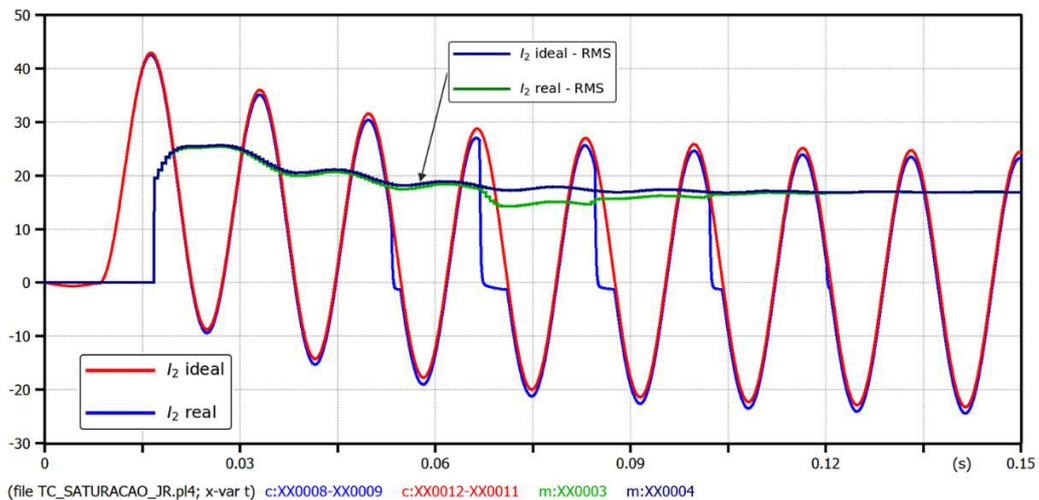
Figura 35 - Forma de onda do curto-circuito monofásico.



Fonte: o próprio autor.

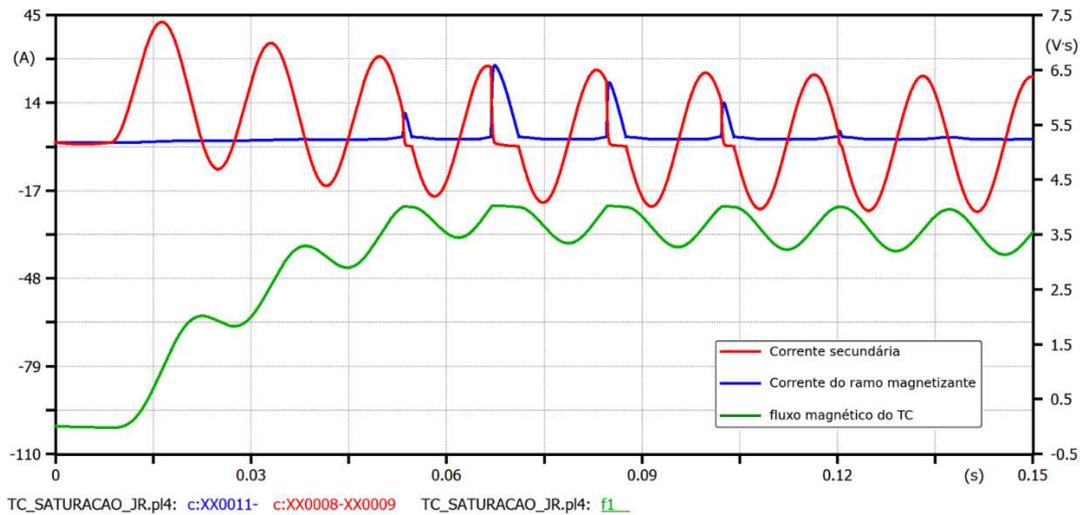
A Figura 36 mostra o resultado das correntes secundárias instantâneas ideal (proporcional à corrente primária conforme relação de transformação do TC) e real (corrente que, de fato, flui no secundário do TC) na fase “A” após um curto-circuito trifásico e seus valores RMS. Na Figura 37 apresenta-se a corrente do ramo magnetizante e a corrente secundária vista pelo relé, junto com o fluxo magnético do TC, durante o evento de curto-circuito.

Figura 36 - Corrente secundária da fase A ideal e real falta trifásica sem religamento.



Fonte: o próprio autor.

Figura 37 – Corrente do secundário e do ramo magnetizante e fluxo magnético do TC da fase A de um curto-circuito trifásico sem religamento.

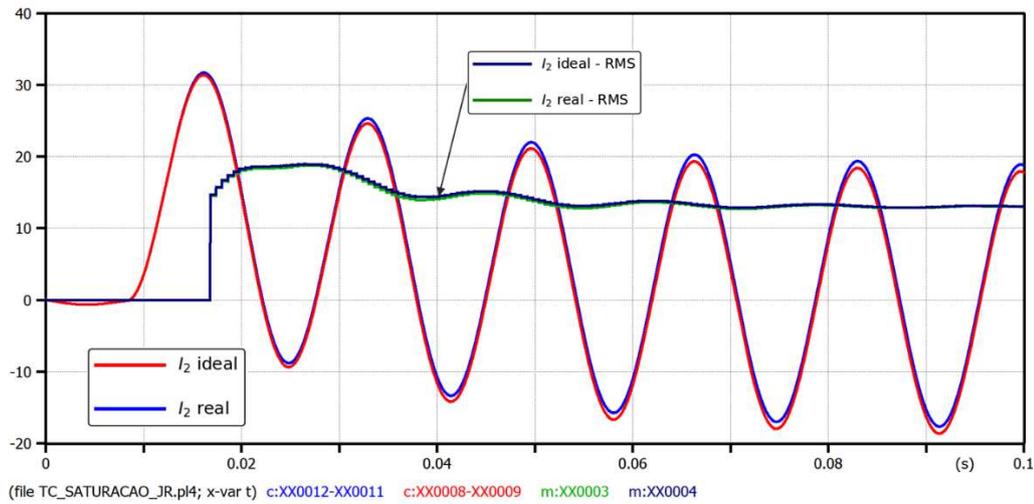


Fonte: o próprio autor.

Verifica-se pelas formas de ondas apresentadas nas Figura 36 e Figura 37 que a corrente secundária vista pelo relé começa a saturar após aproximadamente três ciclos, que é quando o fluxo magnético do TC encontra seu limite em aproximadamente 4 volt-segundo (v's), conforme pode ser observado no eixo das ordenadas do lado direito da Figura 37. Já no quarto ciclo, observa-se de fato a saturação com a queda do valor RMS da corrente ideal (sem saturação) com a corrente real vista pelo relé (com saturação) de aproximadamente 17A para 14A, respectivamente, entretanto por se tratar de uma saturação devido a componente CC assimétrica, o valor RMS da corrente secundária do TC vista pelo relé retorna próximo ao valor ideal após a diminuição da componente CC e também devido à constante de tempo secundária que faz o fluxo diminuir ao longo do tempo. A análise mostrou que os TCs não saturam para o tempo de saturação t'_{al} de 17ms, dessa forma manteve-se a precisão para esse tempo, o que foi demonstrado pelas simulações feita no ATP.

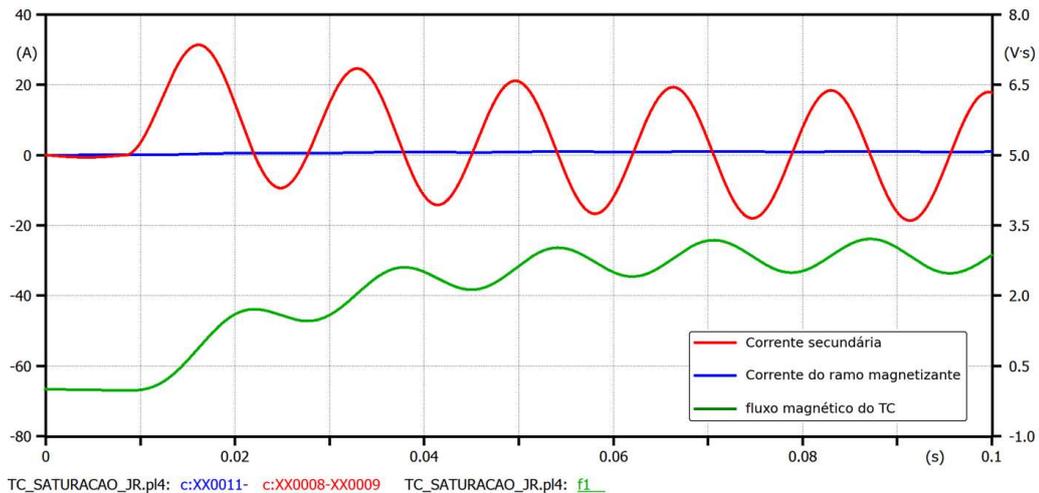
Já as Figura 38 e Figura 39 mostram também as correntes instantâneas e RMS ideal e real do secundário do TC após um curto-circuito monofásico da fase “A”, bem como a corrente do ramo magnetizante e o fluxo magnético do TC.

Figura 38 - Corrente ideal e real de curto-circuito monofásico sem religamento.



Fonte: o próprio autor.

Figura 39 - Corrente do secundário e do ramo magnetizante e fluxo magnético do TC do curto-circuito monofásico sem religamento.



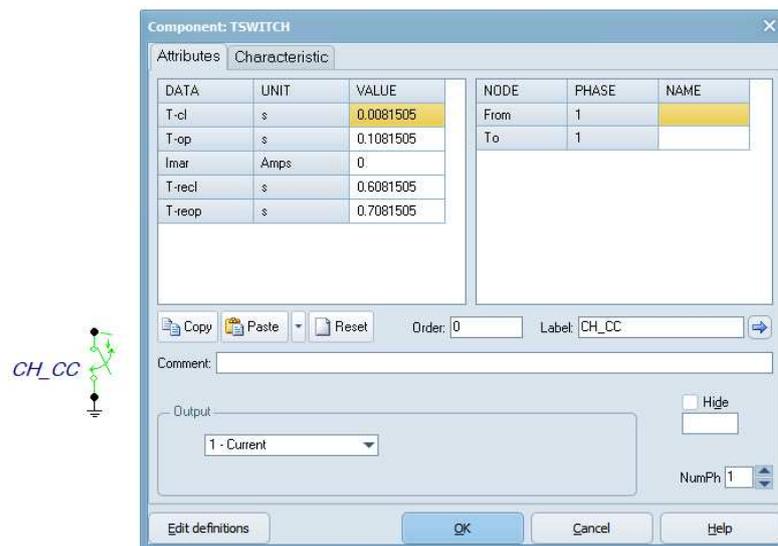
Fonte: o próprio autor.

Verifica-se pelas curvas apresentadas nas Figura 38 e Figura 39 que a corrente secundária vista pelo relé não satura em nenhum momento, visto que o fluxo magnético não alcança o valor limite. A corrente do ramo magnetizante possui a magnitude baixa, indicando que a tensão imposta no ramo magnetizante do TC permanece na região linear do indutor. O cálculo da tensão E_{al} para o curto-circuito monofásico mostrou que o TC não iria saturar para um tempo t'_{al} de 17ms e foi confirmado por meio das simulações que o TC escolhido não entra em saturação, que devido a magnitude da falta monofásica ser menor.

4.3. Simulação de faltas com religamento (C-O-C-O)

Para considerar a função de religamento, foi utilizado como referência a Tabela 1. Dessa forma, foi somado o tempo necessário para o relé processar as funções de proteção adotado igual a 17ms com o tempo necessário para o disjuntor extinguir a falta, totalizando 100ms, o tempo morto considerado é de 500ms e a segunda falta também foi adotado 100ms. Os tempos de primeira falta, tempo morto e segunda falta adicionado nas chaves para simular o curto-circuito com religamento pode ser verificado na Figura 40.

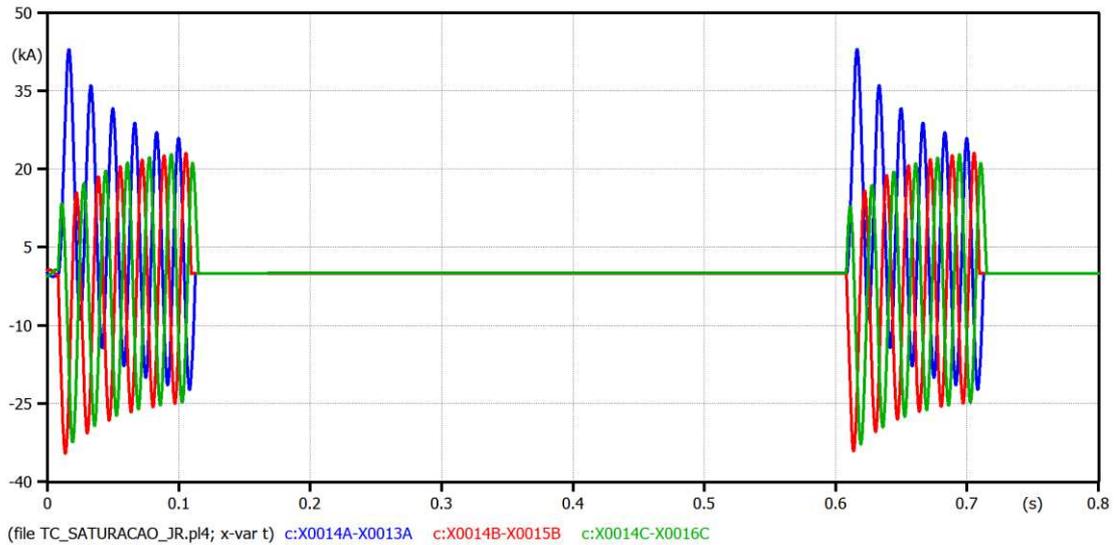
Figura 40 - Dados de entrada da chave utilizada para faltas com religamento.



Fonte: o próprio autor.

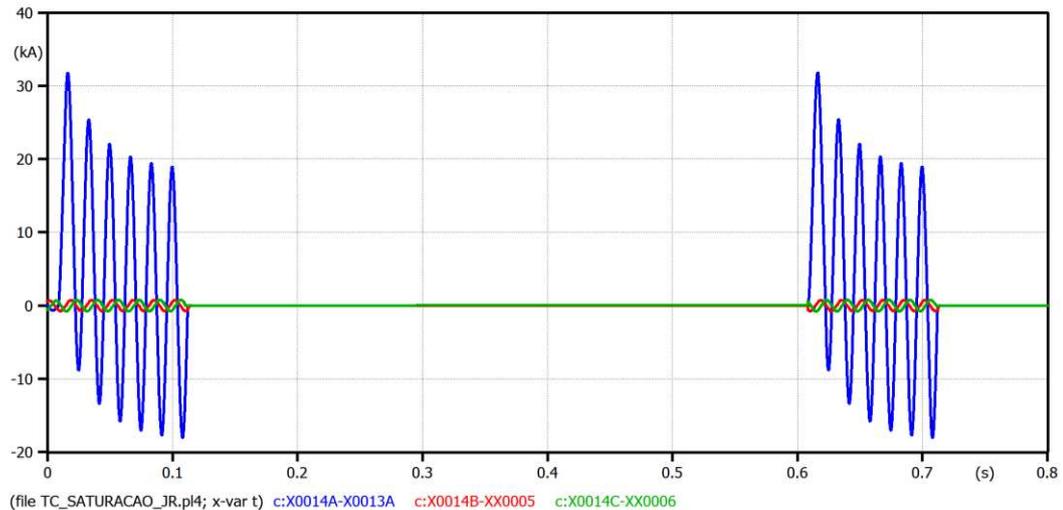
As formas de ondas do curto-circuito trifásico e monofásico com religamento são apresentadas nas Figura 41 e Figura 42, respectivamente. A fase “A” novamente tem o maior pico de corrente devido ao instante de chaveamento com maior componente DC.

Figura 41 - Forma de onda do curto-circuito trifásico com religamento.



Fonte: o próprio autor.

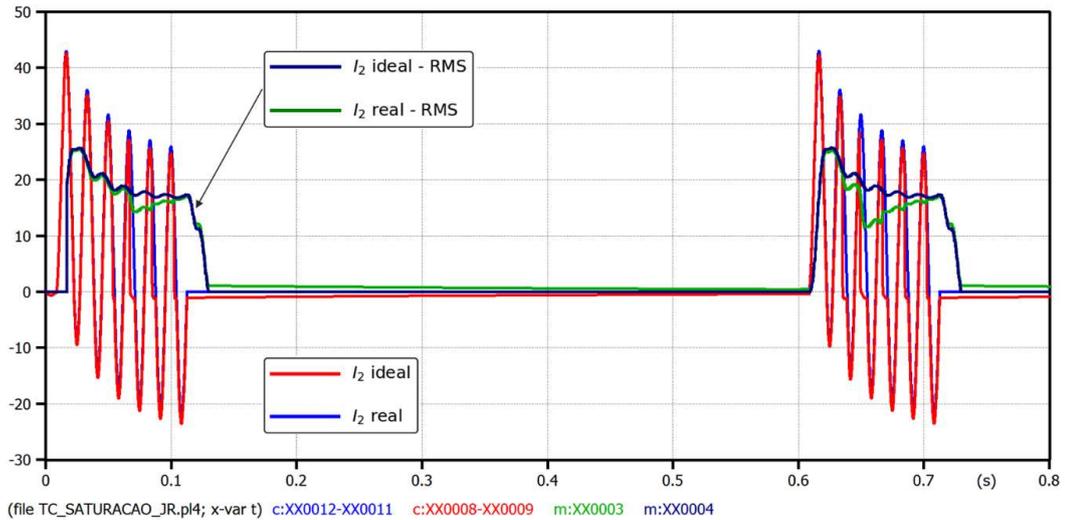
Figura 42 - Forma de onda do curto-circuito monofásico com religamento.



Fonte: o próprio autor.

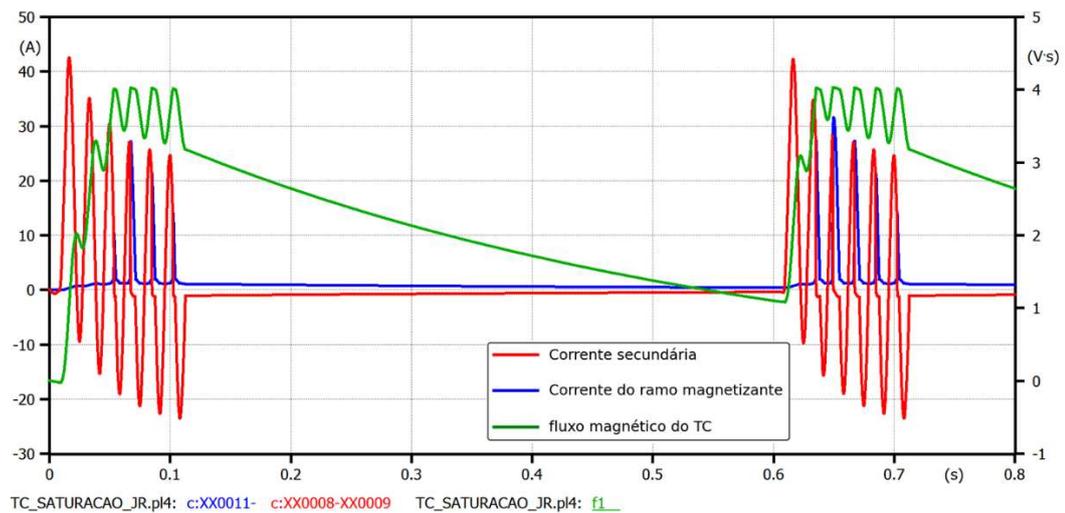
A Figura 43 apresenta o resultado das correntes instantâneas e RMS ideal e real do secundário do TC na fase “A” após um curto-circuito trifásico com religamento. Na Figura 44 apresenta-se a corrente do ramo magnetizante e a corrente secundária vista pelo relé, junto com o fluxo magnético do TC, durante o evento de curto-circuito trifásico com religamento.

Figura 43 - Corrente secundária da fase A ideal e real da falta trifásica com religamento.



Fonte: o próprio autor.

Figura 44 - Corrente do secundário e do ramo magnetizante e fluxo magnético do TC do curto-circuito trifásico com religamento.

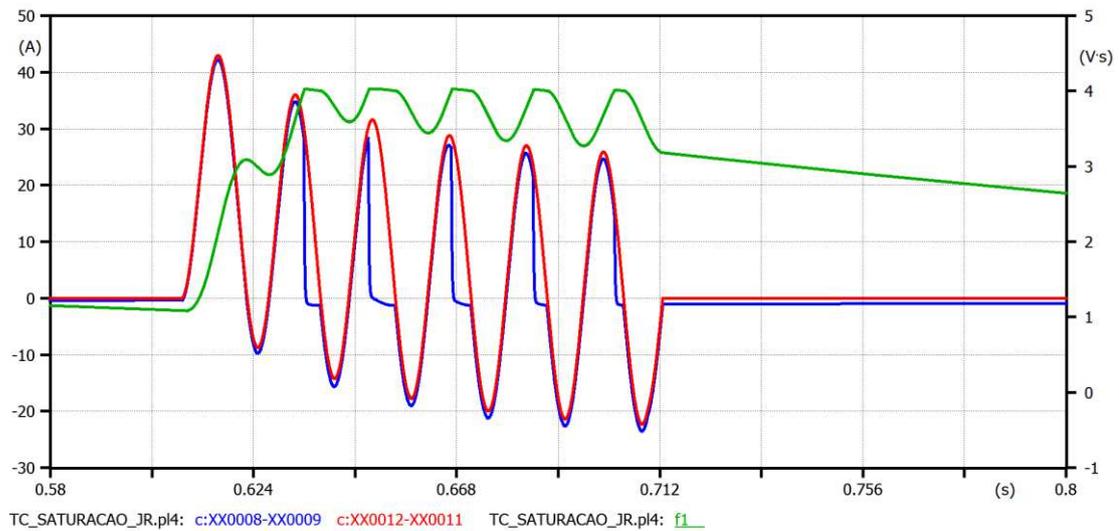


Fonte: o próprio autor.

As formas de onda das Figura 43 e Figura 44 mostram um ciclo de falta de duração 100ms, seguido por um tempo-morto de 500ms e, por fim, outro ciclo de falta de duração 100ms. Verifica-se que a corrente secundária vista pelo relé satura em ambos os ciclos de falta. Embora haja o decaimento do fluxo magnético durante o tempo-morto, durante o segundo ciclo de falta a corrente secundária entra em saturação mais rapidamente devido ao magnetismo residual do núcleo do TC.

A Figura 45 mostra a corrente secundária ideal e real e o fluxo magnético do TC do segundo ciclo de falta de forma ampliada.

Figura 45 - Correntes ideal e real da segunda falta trifásico de ciclo CO-CO e o fluxo magnético do TC.

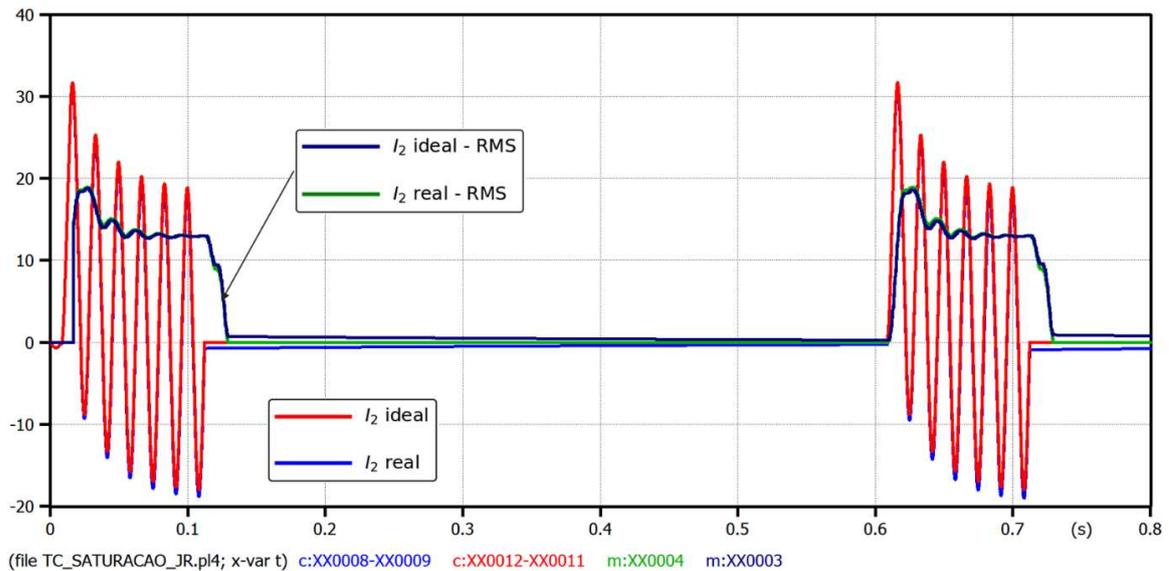


Fonte: o próprio autor.

Percebe-se que o TC entra em saturação em aproximadamente 26ms após o novo ciclo de falta se iniciar, ponto em que o fluxo magnético atinge seu valor limite. Os cálculos analíticos da tensão assimétrica E_{al} para a falta trifásica CO-CO mostra que o TC não satura para um tempo de limite da precisão t''_{al} de 17ms, o que pode ser confirmado em simulação feita no ATP, portanto, diante dessa situação, o relé identificaria a magnitude do curto-circuito de forma precisa e atuaria a proteção.

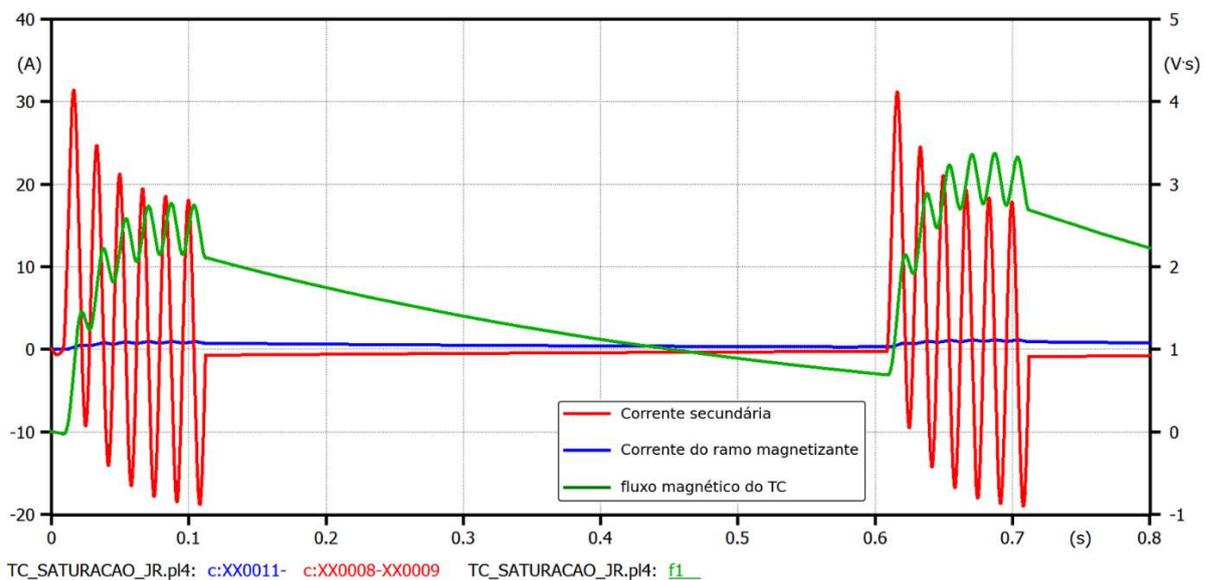
A Figura 46 mostra o resultado das correntes instantâneas e RMS ideal e real do secundário do TC na fase “A” após um curto-circuito monofásico com religamento. Na Figura 47 apresenta-se a corrente do ramo magnetizante e a corrente secundária vista pelo relé, junto com o fluxo magnético do TC, durante o evento da falta.

Figura 46 - Corrente ideal e real de curto-circuito monofásico na fase “A” com religamento.



Fonte: o próprio autor.

Figura 47 - Corrente do secundário e do ramo magnetizante e fluxo magnético do TC do curto-circuito monofásico com religamento.



Fonte: o próprio autor.

É possível observar que não houve saturação durante nenhum momento dos 100ms do primeiro e do segundo ciclo de falta, a corrente ideal e real estão sempre próximas e a magnitude da corrente de ramo magnetizante permanece em um valor baixo, indicando que o indutor está na região linear da curva de saturação. Além disso, também é possível perceber que

o fluxo magnético não atinge o seu limite durante os ciclos de falta. Dessa forma, a corrente que chega ao relé indica que permanece a precisão durante t'_{al} e t''_{al} de 17ms, para correta atuação do sistema de proteção.

4.4. Análise dos resultados

4.4.1. Cálculos da força eletromotriz do TC

Os cálculos analíticos da força eletromotriz (F.E.M) do transformador de corrente foram realizados com base nos parâmetros da subestação simulada, como a corrente de curto-circuito, a relação de transformação do TC e as condições do sistema. Estes cálculos permitem realizar o dimensionamento do TC exigido para o sistema elétrico em questão, garantindo que esteja de acordo com os requisitos de proteção e operação do sistema elétrico.

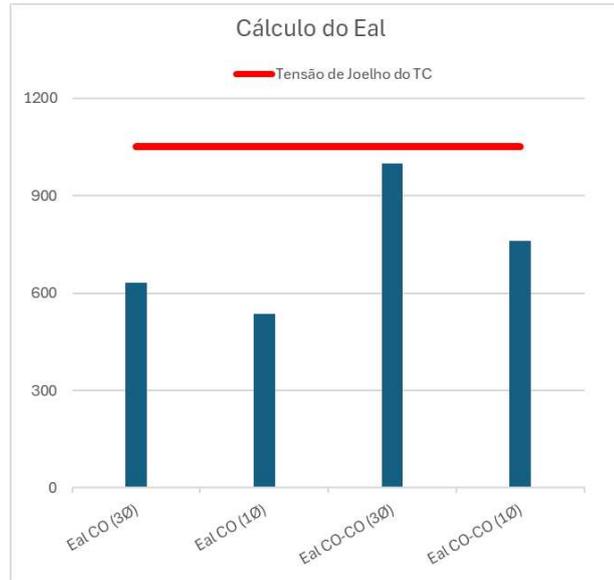
A Figura 48 e a Tabela 6 mostram o resumo dos valores calculados de E_{al} e do tempo de saturação aproximado obtidos por meio das simulações. Com base nela, é possível notar que o parâmetro utilizado como tensão de saturação foi a tensão de Joelho do TC, de forma que para nenhum dos tipos de curto-circuito, a força eletromotriz ultrapassou a tensão de Joelho para um tempo de precisão de 17ms, tempo necessário para o relé processar suas funções de proteção.

Tabela 6 - Resumo de E_{al} e tempos de saturação.

Resumo dos Resultados						
Relação	$V_{Saturação}$	Curto-Circuito	E_{al} (C-O)	T_{sat} - CO	E_{al} (C-O-C-O)	T_{sat} - CO-CO (2º ciclo)
1000/1A	1050 V	Trifásico	632,70 V	41 ms	999,50 V	26 ms
		Monofásico	534,70 V	Não Saturar	760,58 V	Não Saturar

Fonte: o próprio autor.

Figura 48 - Gráfico do limite da precisão da força eletromotriz do TC.



Fonte: o próprio autor.

Observa-se que, embora o valor da força eletromotriz assimétrica (E_{al}) para o curto-circuito monofásico com religamento seja maior do que para o curto-circuito trifásico sem religamento ($760,58 \text{ V} > 632,70 \text{ V}$), a saturação do TC não ocorreu no caso monofásico, enquanto houve saturação no caso trifásico. Isso pode ser explicado pela constante de tempo secundária menor no curto-circuito monofásico, que fez com que o fluxo magnético decaísse mais rapidamente. Com o decaimento mais rápido, o fluxo não alcança o limite de saturação. Já no curto-circuito trifásico, a constante de tempo maior permitiu que o fluxo se acumulasse por mais tempo, resultando na saturação do TC.

Vale destacar que foi utilizado a relação de transformação dos TCs de 1000:1 de forma didática, entretanto essa relação pode ser maior desde que o valor escolhido sensibilize a proteção em condições nominais do sistema.

4.4.2. Dimensionamento da classe de proteção do TC com base no estudo de saturação

Com base nos resultados obtidos e nas características operacionais da usina fotovoltaica estudada, é possível determinar a classe de proteção que os transformadores de corrente (TCs) devem atender, conforme a IEC 61869-2, 2012. Esses dados são fundamentais para especificar o TC e garantir a atuação confiável dos sistemas de proteção. A Tabela 7 mostra

os dados de especificação mínima calculados do TC pela norma e os dados do TC fornecidos pelo fabricante.

Tabela 7 - Especificações do TC.

Equipamento: TC 500kV			
Dados:		Calculado pela norma IEC 61869-2	Fornecido pelo fabricante
Corrente Nominal Primária (A)		1000	3000
Corrente Nominal Secundária (A)		1	1
Tensão Nominal do sistema (kV)		500	500
Frequência (Hz)		60	60
Fator Térmico		1,2	1,2
Enrolamentos de proteção	Classe	TPY	TPY
	Carga (VA)	2,5	5
	Classe de exatidão para corrente simétrica	10P20	10P20
	X/R	13,9	17
	TP (s)	0,0368	0,045
	K_{SSC}	16,87	16,7
	t' e t'' (ms)	100	100
	t'_{al} / t''_{al} (ms)	17	17
	t_{fr} (ms)	500	500
	Assimetria	100%	100%
	E_{al} (V)	1050	1250

Fonte: o próprio autor.

As especificações calculadas foram enviadas para o fabricante para garantir que os TCs a serem instalados estejam devidamente dimensionados para a exigência da subestação em questão. É possível perceber que houve uma margem de segurança nos valores especificados, uma vez que os níveis de curto-circuito no sistema elétrico tendem a aumentar com o tempo.

Ainda no contexto da especificação do TC para evitar saturação, é essencial avaliar também o fluxo remanescente. Quando um surto ou falha ocorre no sistema, mesmo após o desligamento, uma parte do fluxo magnético pode permanecer no núcleo do TC. Esse fluxo remanescente pode ser um problema durante a reenergização do sistema, pois, se o TC já iniciar com um nível de fluxo elevado, ele pode saturar rapidamente ao enfrentar tensões elevadas logo após o religamento. Neste caso, como o TC selecionado é de classe TPY, a questão do fluxo remanescente foi mitigada.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento dos transformadores de corrente (TCs) de 500 kV em situações de curto-circuito, com foco na saturação dos TCs. Para alcançar esse objetivo, foram realizadas simulações no software ATPDraw e cálculos analíticos baseados na norma IEC 61869-2, cujos resultados foram comparados para verificar a precisão dos modelos estudados.

As simulações indicaram que o TC manteve sua precisão durante o tempo estabelecido como limite necessário para que os relés de proteção reconheçam corretamente o valor de corrente. Esse tempo crítico de precisão foi validado tanto por simulações quanto por cálculos analíticos, demonstrando a confiabilidade do TC no cenário de curto-circuito analisado. O estudo ressaltou a importância de garantir que o transformador de corrente permaneça preciso durante eventos de sobrecorrente, para que o sistema de proteção funcione adequadamente.

Os resultados também demonstraram que a escolha de parâmetros como a relação de transformação, o burden, os fatores de dimensionamento da IEC 61869-2 e a classe do TC, como o TPY, que minimiza o fluxo remanescente, são essenciais para evitar a saturação prematura, especialmente em cenários de religamento, pois impede que o TC sature rapidamente após religamentos, proporcionando maior segurança ao sistema.

Adicionalmente, os requisitos definidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que estipulam a necessidade de proteção confiável e eficaz em sistemas de alta tensão, também foram atendidos. A ONS exige que o TC opere adequadamente sob condições de falha, sem saturar rapidamente, para garantir que os relés de proteção operem de forma precisa. A conformidade com esses requisitos de proteção é fundamental para o correto funcionamento do SIN.

Além disso, os valores analíticos calculados para o dimensionamento do TC foram enviados aos fabricantes como base para a construção de um equipamento que atenda às exigências mínimas e específicas da subestação estudada. Nesse sentido, foi pontuado que, para garantir a confiabilidade a longo prazo, deve-se considerar uma margem adicional nos projetos futuros, visto que os níveis de curto-circuito tendem a aumentar com o passar dos anos devido a expansão do sistema elétrico, dessa forma, sem necessidade de substituições ou ajustes frequentes.

Concluindo, este estudo apresentou uma análise detalhada dos requisitos para o correto dimensionamento de TCs, destacando a importância de uma abordagem criteriosa para evitar a saturação e garantir a proteção adequada dos sistemas de alta tensão. A combinação de

simulações e cálculos analíticos baseados em normas internacionais permitiu validar as estratégias adotadas, fornecendo uma base sólida para especificação e projeto de TCs robustos e confiáveis.

Como propostas de trabalho futuros, recomenda-se expandir a análise para incluir outras funções de proteção, como proteção de distância e proteção diferencial, que são amplamente utilizadas em sistemas de transmissão de alta tensão. A análise dessas funções é essencial, uma vez que elas podem responder de maneira diferente à saturação dos transformadores de corrente (TCs), podendo impactar diretamente o desempenho e a precisão dos sistemas de proteção. Além disso, sugere-se uma investigação detalhada sobre os relés de proteção modernos. Tais dispositivos possuem algoritmos avançados de compensação que podem diferir no tempo de resposta do sinal elétrico durante a saturação dos TCs, que pode diminuir o tempo limite de precisão necessário.

REFERÊNCIAS

- Altuve, H. J., Fischer, N., Benmouyal, G., & Finney, D. (2013). **Sizing current transformers for line protection applications**. *2013 66th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 36–51. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2013.6822025>
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas; **NBR 6856**; 2015; **Transformador de corrente**.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas; **NBR 6856**; 2021; **Transformador de corrente**.
- Benmouyal, G., Zocholl, S. E., & Roberts, J. (2011). **Selecting CTs to Optimize Relay Performance**. *SEL Journal of Reliable Power*, 2, 1–10.
- Chowdhury, R., Finney, D., & Fischer, N. (2021). **Determining CT Requirements for Generator and Transformer Protective Relays**. *2021 74th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 1–15.
- Egorova, E. O. (2011). **ATP modeling of internal transformer faults for relay performance testing** [Michigan Technological University]. <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etsds/577>
- Gangadharan, P. K., Sidhu, T. S., & Finlayson, G. J. (2007). **Current Transformer Dimensioning for Numerical Protection Relays**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(1), 108–115. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.881601>.
- Hargrave, A., Thompson, M. J., & Heilman, B. (2018). **Beyond the knee point: A practical guide to CT saturation**. *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, 1–23. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2018.8349779>.
- IEC. (2012). **IEC 61869-2 - Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers**.
- IEC. (2017). **IEC TR 61869-100 - Instrument transformers - Part 100: Guidance for application of current transformers in power system protection**.
- IEEE. (2001). **CT Saturation Theory and Calculator**. In *IEEE Power System Relaying and Control Committee*.
- IEEE. (2006). **std 551-2006 - Recommended Practice for Calculating AC Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems**. In *17 November*.
- IEEE. (2008). **IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes**. In *IEEE*.
- Kezunovic, M., Kojovic, L., Abur, A., Fromen, C. W., Sevcik, D. R., & Phillips, F. (1994). **Experimental evaluation of EMTP-based current transformer models for protective relay transient study**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(1), 405–413. <https://doi.org/10.1109/61.277712>

- LOURENÇO, J. M. A. (2018). **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO DE ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O ATPDraw COM ESTUDO DE CASO DE UM ALIMENTADOR DA REDE AQUIRAZ**. Universidade Federal do Ceará.
- Mardegan, C. S. (2022). **Proteção e Seletividade Em sistemas Elétricos Industriais** (2nd ed.).
- Operador Nacional do Sistema Elétrico. (2014). **Critérios para Análise de Superação de Equipamentos e Instalações de Alta Tensão**.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Submódulo 2.3: Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos**. Revisão 2022.10, Despacho ANEEL nº 2.852/2022, 03 de outubro de 2022.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos**. Revisão 2022.08, Despacho ANEEL nº 1.772/2022, 10 de agosto de 2022.
- PEREIRA, P. S., PEREIRA JUNIOR, P. S., & LOURENÇO, G. E. (2017). **Parte 1, 2 e 3 - Características de Transformadores de Corrente de Acordo com as Normas IEC 60044-1, 60044-6, 61869-2, IEEE C57.13, NBR 6856 1992 e 2015 e do Technical Report TR 61869-100 (2017)**. *Protcom - Proteção e Comunicação de Sistemas Elétricos de Potência*.
- Rodrigues, R. O. (2016). **Estudo de identificação e análise de superação de transformadores de corrente**. Universidade Federal do Ceará.
- Santos, E. M. dos. (2015). **Compensação das formas de onda distorcidas pela saturação de transformadores de corrente com auxílio da estimação de frequência**. Universidade Federal de Santa Maria.
- SAMPAIO, Raimundo Furtado. (2021). **Transformadores de Instrumentos: Unidade 7**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica. Apostila da disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.
- WIJAYAPALA, W.D.A.S.; KARUNANAYAKE, J.; MADAWALA, R.R.T.W.M.R.A.I. **Current Transformer Performance during Transient Conditions and the Development of a Current Transformer Selection Criterion for Protection Applications**. *ENGINEER - Journal of The Institution of Engineers, Sri Lanka*, v. XLIX, n. 03, p. 49-61, 2016.
- Fonti, P. (2000). **Current transformers: specification errors and solutions (Cahier technique no. 195)**. Schneider Electric.