

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JÚLIO CÉSAR CASTELHANO DOS SANTOS

AJUSTE ADAPTATIVO APLICADO A TÉCNICAS PARA DETECÇÃO  
DOS INTERVALOS DISTORCIDOS PELA SATURAÇÃO DE TCS NOS  
SINAIS DE CORRENTE SECUNDÁRIA

Alegrete  
2021

**JÚLIO CÉSAR CASTELHANO DOS SANTOS**

**AJUSTE ADAPTATIVO APLICADO A TÉCNICAS PARA DETECÇÃO  
DOS INTERVALOS DISTORCIDOS PELA SATURAÇÃO DE TCS NOS  
SINAIS DE CORRENTE SECUNDÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal do Pampa,  
como requisito parcial para obtenção do  
Título de Engenheiro Eletricista.  
Orientador: Eduardo Machado dos Santos

**Alegrete  
2021**



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**JÚLIO CÉSAR CASTELHANO DOS SANTOS**

**AJUSTE ADAPTATIVO APLICADO A TÉCNICAS PARA DETECÇÃO DOS INTERVALOS DISTORCIDOS PELA SATURAÇÃO DE TCS NOS SINAIS DE CORRENTE SECUNDÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 de abril de 2021.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva  
UNIPAMPA

---

Eng. Arian Rodrigues Fagundes  
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **EDUARDO MACHADO DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/04/2021, às 19:35, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CHRYSYIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/04/2021, às 19:37, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Arian Rodrigues Fagundes, Usuário Externo**, em 27/04/2021, às 19:43, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0510249** e o código CRC **41EDE170**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete  
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550  
Telefone: (55) 3422-8400

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos pelos conhecimentos compartilhados durante a elaboração deste trabalho, bem como pelo profissionalismo, amizade e exemplo dado durante toda graduação.

Aos demais professores da Universidade Federal do Pampa pelo empenho, dedicação e participação primordial na minha formação.

À Universidade Federal do Pampa pelo suporte recebido durante o curso.

A todos os colegas do grupo de pesquisa GESEP pelas trocas de experiências, pelos conhecimentos compartilhados, pelas conversas construtivas e pela amizade que foi formada dentre os membros do grupo.

A todos os amigos e colegas que fiz durante a graduação, em especial, Artur Rodrigues, Gabrielli Pizzolato, Gabriel Garcia, Humberto Hasselein, Mateus Franco, Matheos Wermuth e Marcelo Romanssini.

A minha namorada Cibeli Beatriz Scherer, pelo companheirismo, amor e dedicação que serviram de apoio e inspiração para a elaboração deste trabalho.

Agradeço a todos meus familiares, em especial meus pais, Edésio e Ana, pela essencial participação em minha formação como pessoa e pelo suporte dado durante toda minha vida.

A Deus por tudo.

“A persistência é o caminho do êxito”.

Charles Chaplin

## RESUMO

Neste trabalho são apresentados conceitos relativos à saturação magnética em Transformadores de Corrente (TCs) e suas consequências sobre os esquemas de proteção de Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Também, são descritos os principais aspectos dos TCs como, por exemplo, tipos construtivos, circuito equivalente, dimensionamento, fluxo magnético remanescente, dentre outras informações que são necessárias para o entendimento do problema abordado. Além disso, são apresentados dois novos métodos para detecção dos intervalos distorcidos dos sinais de corrente secundária. Ambos algoritmos propostos são baseados em limites adaptativos. Um deles utiliza o limite adaptativo para comparação com os sinais das Funções-Diferença do sinal de corrente amostrado. O outro método utiliza o cálculo do ângulo entre amostras consecutivas do sinal de corrente, para realizar a detecção através da comparação com o limite proposto. Através de simulações de curtos-circuitos, realizadas no software EMTP-ATP, foram obtidos os sinais de corrente secundária distorcidos por saturação. Os métodos propostos foram implementados no software MATLAB® sendo realizados diversos testes para comprovação de suas eficiências. Dentre as análises feitas, foram simuladas faltas monofásicas e trifásicas, além da variação do fluxo magnético remanescente no núcleo do transformador e da carga conectada em seus terminais secundários. Em todos os testes, para ambas metodologias, os resultados foram satisfatórios na detecção dos intervalos distorcidos. Sendo assim, os métodos propostos nesta pesquisa demonstraram-se robustos e eficazes podendo, desta forma, colaborar com a mitigação dos efeitos negativos causados pela saturação dos TCs nos esquemas de proteção de SEP.

Palavras-Chave: Ângulo; Amostras Consecutivas; Curto-circuito; Detecção; Funções-Diferença; Intervalos Distorcidos; Proteção de Sistemas Elétricos de Potência; Saturação Magnética; Transformadores de Corrente.

## ABSTRACT

This work presents concepts related to magnetic saturation in Current Transformers (CTs) and its consequences on the protection schemes of Electric Power Systems (EPS). Also, the main aspects of the CTs are described, such as constructive types, equivalent circuit, dimensioning, remaining magnetic flux, among other information that is necessary to understand the problem addressed. In addition, two new methods are presented for detecting the distorted intervals of secondary current signals. Both proposed algorithms are based on adaptive limits. One uses the adaptive limit for comparison with the Signals of Difference Functions of the sampled current signal. The other method uses the calculation of the angle between consecutive samples of the current signal, to perform the detection through comparison with the proposed limit. Through simulations of short circuits, performed in the EMTP-ATP software, secondary current signals distorted by saturation were obtained. The proposed methods were implemented in the MATLAB® software and several tests were carried out to prove their efficiencies. Among the analyzes performed, simulated single-phase and three-phase faults, in addition to the variation of the magnetic flux remaining in the transformer core and the load connected at its secondary terminals. In all tests, for both methodologies, the results were satisfactory in detecting the distorted intervals. Thus, the methods proposed in this research proved to be robust and efficient, thus being able to collaborate with the mitigation of the negative effects caused by the saturation of CTs in the EPS protection schemes.

Keywords: Angle; Consecutive Samples; Short Circuit; Detection; Difference Functions; Distorted ranges; Protection of Electric Power Systems; Magnetic saturation; Current transformers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Circuito Equivalente do TC com carga conectada.....	24
Figura 2.2 - Curvas de excitação para um TC C400 com diferentes RTCS. ....	26
Figura 2.3 - Definição do Ponto de Joelho segundo a norma IEC 60044-1. ....	27
Figura 2.4 – TC com vários enrolamentos primários. ....	33
Figura 2.5 - TC com vários núcleos secundários.....	33
Figura 2.6 - TC com vários enrolamentos secundários. ....	33
Figura 2.7 – TCs de diferentes tipos construtivos utilizados para proteção. (a) TC do tipo enrolado. (b) TC do tipo bucha. (c) TC do tipo janela. (d) TC do tipo barra. ....	34
Figura 2.8 – Circuito equivalente simplificado de um TC.....	35
Figura 2.9 – Formas de onda da corrente secundária para um TC com saturação e sem saturação.....	36
Figura 2.10 – Relação entre corrente primária, secundária e fluxo (TC não saturado).	37
Figura 2.11 - Relação entre corrente primária, secundária e fluxo (TC saturado).....	38
Figura 3.1 – Sinal de corrente com distorções causadas por saturação e suas respectivas funções-diferença.....	47
Figura 3.3 - Sinal de corrente secundária de um TC sem saturação.....	50
Figura 3.4 - Módulo da diferença entre pontos consecutivos do sinal de corrente. ....	51
Figura 3.5 - Sinal de corrente secundária de um TC saturado .....	51
Figura 3.6 - Módulo da diferença entre pontos consecutivos do sinal de corrente. ....	52
Figura 3.1 - Ângulo das diferenças. ....	52
Figura 4.1 – Sistema Teste .....	46
Figura 4.1 - Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Terceira função-diferença do sinal e os limites de início e fim do intervalo de saturação. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%. ....	49
Figura 4.2 - Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Módulo do ângulo das diferenças entre amostras consecutivas. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%. ....	50

Figura 4.3 – Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Terceira função-diferença do sinal e os limites de início e fim do intervalo de saturação. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%. .....	52
Figura 4.4 - Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Módulo do ângulo das diferenças entre amostras consecutivas. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%. .....	53
Figura 4.5 – Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Terceira função-diferença do sinal e os limites de início e fim do intervalo de saturação. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%. .....	55
.....	55
Figura 4.6 – Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Módulo do ângulo das diferenças entre amostras consecutivas. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%. .....	56
Figura 4.7 – Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Terceira função-diferença do sinal e os limites de início e fim do intervalo de saturação. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%. .....	57
.....	57
Figura 4.8 – Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Módulo do ângulo das diferenças entre amostras consecutivas. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%. .....	58
Figura 4.9 - Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Terceira função-diferença do sinal e os limites de início e fim do intervalo de saturação. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%. .....	59
Figura 4.10 - Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Módulo do ângulo das diferenças entre amostras consecutivas. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%. .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classe de Exatidão de Transformadores de Corrente de acordo com a classificação dos Relés de Proteção.....	29
Tabela 2.2 – Cargas Padrão para TCs com 5 A nos enrolamentos secundários .....	31
Tabela 7.1 - Comparação Teste 1.....	70
Tabela 7.2 - Comparação Teste 2.....	70
Tabela 7.3 - Comparação Teste 4.....	71
Tabela 7.4 - Comparação Teste 5.....	71
Tabela 7.5 - Comparação Teste 6.....	72
Tabela 7.6 - Comparação Teste 7.....	72
Tabela 7.7 - Comparação Teste 8.....	73
Tabela 7.8 - Comparação Teste 9.....	73

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1 Considerações Gerais .....	15
1.2 Motivação .....	16
1.3 Revisão Bibliográfica .....	17
1.4 Objetivos do Trabalho.....	20
1.5 Estrutura do Trabalho.....	20
<b>2. FUNDAMENTOS DOS TCs.....</b>	<b>22</b>
2.1 Considerações Gerais .....	22
2.2 TC.....	22
2.3 Relação de Transformação de um TC .....	23
2.4 Circuito Equivalente de um Transformador de Corrente .....	24
2.5 Fator de Sobrecorrente do Transformador de Corrente .....	25
2.6 Fator Térmico Nominal .....	26
2.7 Curvas de Excitação do TC.....	26
2.8 Ponto de Joelho da Curva de Excitação.....	27
2.9 Classe de Exatidão e Nomenclatura dos TCs .....	28
2.9.1 Classe de Exatidão e Nomenclatura padrão ABNT.....	28
2.9.2 Classe de Exatidão e Nomenclatura Padrão ANSI .....	29
2.10 Cargas padronizadas para TCs .....	31
2.11 Características Construtivas dos TCs.....	31
2.12 Especificações de TCs quanto à RTC.....	33
2.12.1 Critério da Corrente Nominal de Carga do Alimentador.....	34
2.12.2 Critério do Curto-Circuito .....	35
2.13 Saturação de TCs: Causas e Efeitos .....	35
2.13.1 Componente DC e sua Influência na Saturação do TC .....	37

2.13.2 Critérios para Evitar a Saturação envolvendo a Carga e Tensão de Saturação.....	38
2.13.3 Parâmetros que Interferem no Tempo até a Saturação .....	39
2.13.4 Os Efeitos causados pelo Fluxo Remanescente .....	41
2.13.5 Os Impactos da Saturação nos Principais Tipos de Proteção.....	42
2.13.5.1 Impactos causados na proteção com Relés de Sobrecorrente.....	42
2.13.5.2 Impactos causados na proteção com Relés de Distância .....	43
2.13.5.3 Impactos causados na proteção com Relés Diferenciais.....	43
2.14 Considerações Finais.....	43
<b>3. TÉCNICAS PROPOSTAS PARA A DETECÇÃO DOS INTERVALOS DISTORCIDOS PELA SATURAÇÃO DOS TCs.....</b>	<b>45</b>
3.1 Considerações Gerais .....	45
3.2 Detecção da Saturação Baseado nas Funções-Diferença do Sinal Analisado.....	46
3.3 Técnica de Detecção Proposta Baseada na Terceira Função-Diferença do Sinal de Corrente.....	47
3.4 Técnica de Detecção Proposta Baseada no Ângulo entre Amostras Consecutivas da Primeira Função-Diferença do Sinal de Corrente.....	50
3.5 Considerações Finais.....	53
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
4.1 Considerações Gerais .....	46
4.2 Sistema Teste.....	46
4.3 Testes Realizados.....	48
4.3.1 Teste 1: Falta Trifásica com 0% de Fluxo Remanescente Carga de 4 $\Omega$ .....	48
4.3.1.1 <i>Resultados para a Detecção da Saturação Através da Terceira Função-Diferença com Ajuste Adaptativo .....</i>	<i>48</i>
4.3.1.2 <i>Resultados para a Detecção da Saturação Através do Ângulo entre Amostras Consecutivas .....</i>	<i>49</i>
4.3.2 Teste 2: Falta Trifásica com 50% de Fluxo Remanescente e Carga de 4 $\Omega$ .	51

4.3.2.1	<i>Resultados para a Detecção da Saturação Através da Terceira Função-Diferença com Ajuste Adaptativo</i> .....	51
4.3.2.2	<i>Resultados para a Detecção da Saturação Através do Ângulo entre Amostras Consecutivas</i> .....	52
4.3.3	Teste 3: Falta Trifásica com 0% de Fluxo Remanescente e Carga de 10 $\Omega$ .	53
4.3.3.1	<i>Resultados para a Detecção da Saturação Através da Terceira Função-Diferença com Ajuste Adaptativo</i> .....	53
4.3.3.2	<i>Resultados para a Detecção da Saturação Através do Ângulo entre Amostras Consecutivas</i> .....	54
4.3.4	Teste 4: Falta Monofásica com 0% de Fluxo Remanescente e Carga de 4 $\Omega$	54
4.3.4.1	<i>Resultados para a Detecção da Saturação Através da Terceira Função-Diferença com Ajuste Adaptativo</i> .....	55
4.3.4.2	<i>Resultados para a Detecção da Saturação Através do Ângulo entre Amostras Consecutivas</i> .....	56
4.3.5	Teste 5: Falta Monofásica com 0% de Fluxo Remanescente e Carga de 100 $\Omega$ .....	57
4.3.5.1	<i>Resultados para a Detecção da Saturação Através da Terceira Função-Diferença com Ajuste Adaptativo</i> .....	58
4.3.5.2	<i>Resultados para a Detecção da Saturação Através do Ângulo entre Amostras Consecutivas</i> .....	59
4.4	Análise dos Resultados e Comparação com Outras Metodologias.....	61
4.5	Considerações Finais.....	62
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>63</b>
5.1	Conclusões .....	63
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>65</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>70</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Gerais

Os Transformadores de Corrente (TCs) são elementos de extrema importância em esquemas de proteção dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Esses equipamentos rebaixam os níveis dos sinais de corrente da rede, de acordo com suas relações de transformação de corrente (RTC). Com isso, possibilitam o acesso a esses sinais em seus terminais secundários para a aplicação na proteção de SEP.

Os sinais de corrente secundária dos TCs determinam a atuação dos relés de proteção. Portanto, devem garantir proporcionalidade de módulo e fase com relação aos sinais de corrente presentes na rede, para assim, permitirem o correto funcionamento dos relés, proporcionando uma atuação correta do sistema de proteção.

Desta forma, visando à garantir a transformação com certo grau de exatidão, os TCs são projetados com base em normas internacionais. Dentre essas normas estão a *IEEE Std C37.110-2007* e a *IEEE Std C57.13-2016*. Existe também uma norma nacional a qual expõe especificações de projeto, características e ensaios de TCs, que é a *ABNT NBR - 6856*.

Cabe ressaltar que esses transformadores possuem em suas estruturas núcleos constituídos de materiais ferromagnéticos. Por conta disto, estão sujeitos a um fenômeno físico denominado saturação magnética. A saturação ocorre por diversos fatores, dentre eles destacam-se: o fluxo remanescente no núcleo antes da falta, as componentes unidirecionais das correntes de curto-circuito, a carga conectada em seus terminais secundários e, também, o mau dimensionamento do TC.

Quando ocorre a saturação do núcleo de um TC, o sinal reproduzido em seus terminais secundários sofre distorções. Com isso, perde-se a proporcionalidade com a corrente da rede, resultando na má atuação dos relés de proteção e colocando em risco a confiabilidade do SEP no qual esses equipamentos estão instalados.

A partir da década de 70, houve um grande desenvolvimento da tecnologia digital. Com isso, surgiram relés digitais microprocessados, os quais passaram a ser amplamente utilizados em esquemas de proteção de sistemas elétricos (GOES, 2013). Esse modelo de relé permitiu a introdução de algoritmos numéricos com o intuito de melhorar o processamento de sinais e a confiabilidade dos sistemas. Nesse contexto, muitas técnicas para a detecção e correção dos trechos de sinais de correntes distorcidos por saturação de TCs, foram propostas na literatura.

Embora seja um assunto com uma abordagem avançada em diversos estudos realizados no mundo todo, as técnicas propostas para a detecção e correção desses sinais distorcidos ainda não são amplamente aplicadas. Isso ocorre por conta das dificuldades de implementação e, também, em decorrência da sensibilidade dos algoritmos envolvidos nesse problema (SANTOS, 2015).

Portanto, faz-se necessário o estudo mais aprofundado deste tema, além da busca pelo desenvolvimento de novas técnicas ou aprimoramento de técnicas já existentes. Buscando, assim, garantir uma boa atuação dos esquemas de proteção mesmo quando sujeitos ao fenômeno da saturação em transformadores de corrente.

## 1.2 Motivação

A partir dos anos 70, estudos relacionados ao fenômeno da saturação e seus impactos nos esquemas de proteção passaram a ocorrer com maior frequência na literatura. Exemplos desses estudos podem ser encontrados em Conner *et al.* (1974), Vanderleck *et al.* (1976), Stringer (1997), Zocholl & Schweitzer (1998), Kojovic (2002), Klock (2005), El-Amin & Al-Abbas (2006), Gangadharan *et al.* (2007), Mooney (2008), Reis & Senger (2008) e Fagundes (2016).

Aliado a essas pesquisas, com o desenvolvimento tecnológico e o avanço da computação, passaram a existir estudos para a elaboração de métodos de detecção e correção dos sinais de corrente distorcidos, visando mitigar os problemas causados em esquemas de proteção. Exemplos desses métodos podem ser encontrados em Hosemann

& Steigerwald (1993), Kang *et al.* (1997), Kang *et al.* (2001), Kang *et al.* (2004), Villamagna & Peter (2006), Dashti *et al.* (2007), Rebizant *et al.* (2008), Guerra *et al.* (2009), Hong & Wei (2010), Santos *et al.* (2010), Ajaei *et al.* (2011), Santos *et al.* (2013), Kang *et al.* (2014), Kumar *et al.* (2016) e Hossain *et al.* (2018).

Com o advento dos relés numéricos, a implementação prática dos métodos propostos nessas pesquisas tornou-se viável. Entretanto, embora os métodos funcionem com eficácia em alguns casos específicos, nenhum se mostrou realmente eficaz em todas as possíveis situações as quais um sistema de potência pode ser submetido.

Nesse contexto, ocorreu a motivação para este trabalho, no qual o foco principal é desenvolver um novo algoritmo para a detecção de intervalos de saturação, que alie robustez, facilidade de implementação e eficiência na detecção dos trechos distorcidos. Além disso, o algoritmo será comparado com outros métodos já existentes na literatura com o auxílio de um método de correção do sinal de corrente, visando com isso, garantir que o método possa diminuir os impactos que a saturação dos TCs pode causar na atuação dos relés de proteção.

### 1.3 Revisão Bibliográfica

O avanço tecnológico dos relés de proteção permitiu, através dos relés digitais, a inserção de algoritmos numéricos para a análise dos sinais de corrente da rede elétrica. A partir disso, diversas metodologias foram propostas na literatura especializada, com o intuito de melhorar a análise desses sinais e garantir uma correta atuação da proteção.

Em Yang *et al.* (1990), os autores propuseram um algoritmo para a detecção de intervalos de corrente distorcidos por saturação, baseado na inclinação entre amostras consecutivas do sinal de corrente analisado. Essa inclinação foi obtida assumindo uma forma de onda senoidal para a corrente e realizando a derivada deste sinal. Mais recentemente, Hooshyar *et al.* (2013) também propuseram um método de detecção que utiliza como critério a análise da inclinação de pontos subsequentes do sinal amostrado.

Hosemann *et al.* (1993), implementaram um método de detecção baseado na proteção diferencial com um ou três transformadores, sem levar em consideração o fluxo magnético remanescente no núcleo do TC. Entretanto, esse fluxo remanescente tem grande importância na saturação do transformador e, desprezá-lo, pode acarretar em erros quando a aplicação for realizada em um sistema real.

Já em Kang *et al.* (2001), os autores implementaram um método com a utilização das funções-diferença do sinal amostrado. Tais funções servem como base para o algoritmo implementado nesta pesquisa. Ainda em Kang *et al.* (2004), os mesmos autores modificaram o algoritmo anterior, e passaram a utilizar um limite constante para a detecção que leva em consideração a máxima corrente de curto-circuito do sistema analisado. Os autores destacam ainda, que mesmo com a modificação proposta, ainda existem alguns casos para os quais o algoritmo proposto perde o sincronismo na detecção do início/fim dos intervalos de saturação.

Dashti *et al.* (2007) propuseram uma metodologia de detecção que leva em consideração o intervalo de cruzamento por zero da corrente analisada, devido a componente DC da corrente de curto-circuito da linha. Os autores identificaram que as correntes com o decaimento da componente DC têm cruzamento por zero no instante do primeiro meio ciclo e em alguns semi-ciclos ímpares após o início da falta.

Utilizando-se da morfologia matemática, Lu *et al.* (2008) criaram um algoritmo para detectar e corrigir sinais de corrente distorcidos pela saturação dos TCs. O método demonstrou um bom desempenho tanto para saturações causadas por faltas monofásicas quanto trifásicas, mesmo com diferentes porcentagens de fluxo magnético residual. Entretanto, essa metodologia foi elaborada tomando como partida o circuito magnetizante de um transformador com núcleo toroidal, por conta disso, pode não ser eficaz caso o TC não tenha o núcleo com essas mesmas características.

Yu (2010) propõe um método de detecção baseado no fator de decaimento da corrente de falta. Nesta metodologia, o autor encontra um intervalo desse fator para o

qual a corrente não está saturada. Com isso, ao calcular esse fator, se o mesmo estiver fora do intervalo determinado, detecta-se então que o sinal analisado está saturado. No mesmo ano, Santos *et al.* (2010) criaram uma metodologia de detecção, baseada no cálculo do módulo da diferença entre dois pontos consecutivos do sinal amostrado e no ângulo formado entre a diferença atual e a diferença anterior. Neste caso, o método mostrou-se eficiente até em situações onde componentes harmônicas foram inseridas no sinal de corrente.

Em 2013, um algoritmo baseado na distância entre pontos consecutivos em um plano formado pela corrente secundária e suas funções-diferença, foi proposto por Santos *et al.* (2013). Esta metodologia mostrou-se eficiente nos testes realizados, incluindo a variação do fluxo magnético remanescente, tanto para faltas monofásicas quanto trifásicas.

Já em Kang *et al.* (2014), o algoritmo para a detecção dos intervalos saturados é implementado através da Transformada Wavelet Discreta, utilizando a família Daubechies 2. Além disso, o programa contém um filtro passa-alta de segunda ordem do tipo Butterworth, que serve para extrair os picos dos sinais obtidos com a transformada e melhorar a detecção de início e fim da saturação. Nos testes realizados, o método mostrou-se eficaz na detecção dos intervalos com diferentes porcentagens de fluxo remanescente no núcleo do TC.

Recentemente, Kumar *et al.* (2016) basearam-se na primeira diferença de magnitudes da curva de Lissajous, a qual foi obtida através do sinal de corrente secundária e de sua primeira derivada. Para a obtenção dos intervalos de saturação, os autores identificaram que, quando a corrente não está saturada, a curva de Lissajous tem uma forma suave. No entanto, quando ocorre à saturação, essa suavidade é perdida. O método mostrou-se eficaz para testes com diferentes tipos de carga, incluindo cargas com fator de potência diferente de um.

Por fim, em Hossain *et al.* (2018), os autores utilizaram-se da proteção diferencial para identificar os intervalos de saturação. Para isso, foi analisado o coeficiente de alienação que é o indicador de não similaridade entre os sinais de corrente na proteção diferencial. Este método mostrou-se eficaz para os testes realizados pelos autores. No entanto, ele foi elaborado através de uma configuração do modelo de proteção diferencial, não sendo útil para outros esquemas de proteção.

#### **1.4 Objetivos do Trabalho**

O presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo geral abordar assuntos acerca da saturação de transformadores de corrente utilizados para serviços de proteção. Além disso, foram propostas duas metodologias de detecção dos intervalos de saturação.

Como objetivos específicos citam-se:

- Desenvolver novas metodologias para detecção dos intervalos distorcidos por saturação, existentes na forma de onda da corrente secundária do TC;
- Analisar o desempenho dos métodos propostos através de simulações computacionais.

#### **1.5 Estrutura do Trabalho**

No Capítulo 2, são expostos os aspectos fundamentais dos transformadores de corrente, bem como sua modelagem, especificações quanto à relação de transformação, o fenômeno da saturação e os efeitos dela sobre os principais tipos de proteção. Neste capítulo, é realizado um embasamento teórico para o entendimento do funcionamento dos TCs. Além disso, também é feito um detalhamento dos tipos construtivos e de dimensionamento desses equipamentos.

No Capítulo 3, descreve-se o método proposto nesta pesquisa para a detecção dos intervalos de corrente distorcidos por saturação. Essa descrição é realizada detalhadamente para facilitar a compreensão e implementação do mesmo.

No Capítulo 4, são expostos os resultados referentes a simulações e testes utilizando as metodologias propostas no trabalho. Os resultados expõem de maneira gráfica a atuação dos algoritmos na detecção dos trechos distorcidos, além disso, para fins de comprovação dos métodos, existe a comparação do sinal do detector com um sinal de erro percentual entre a corrente ideal a ser reproduzida e a corrente com distorções.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTOS DOS TCs

### 2.1 Considerações Gerais

O desenvolvimento de técnicas relacionadas à detecção e correção dos intervalos de sinais, onde a corrente secundária encontra-se distorcida pela saturação dos TCs, depende diretamente do conhecimento acerca deste fenômeno. Portanto, neste capítulo, são apresentados os conceitos fundamentais relacionados aos Transformadores de Corrente, enfatizando os motivos que causam sua saturação, bem como as consequências que este fenômeno provoca nos esquemas de proteção de SEP.

### 2.2 TC

Os TCs exercem diversas funções muito importantes em um SEP. Dentre essas funções, são tidas como principais:

- Reproduzir em menor escala, em seus terminais secundários, a corrente do sistema elétrico de forma proporcional, em módulo e fase;
- Fornecer em seus terminais secundários, um nível de corrente elétrica que garanta o correto e seguro funcionamento dos equipamentos ali conectados;
- Garantir que os equipamentos conectados nos terminais secundários estejam isolados do sistema elétrico e, com isso, evitar maiores danos causados pelos altos níveis de corrente da rede.

Os enrolamentos primários dos TCs são conectados em série com o sistema de potência. Em seus terminais secundários são conectadas as cargas, também em série. Tal configuração permite o acesso às correntes da rede elétrica, em níveis aceitáveis aos equipamentos de medição e proteção.

Para que os engenheiros consigam obter um melhor aproveitamento das utilidades dos TCs, existem diferentes guias de aplicações. Tais documentos informativos detalham como esses equipamentos podem ser utilizados e, além disso, expõem as principais características que eles apresentam. O *IEEE Std C37.110-2007*, por exemplo, apresenta

as aplicações dos TCs utilizados para esquemas de proteção. Neste guia existe uma lista com termos e definições de aplicação desses equipamentos, os quais se destacam:

- Precisão: Medida que corresponde ao nível de reprodução do sinal de corrente nos terminais secundários dos TCS, com relação à corrente obtida nos terminais primários;
- Classes de exatidão: Valor estabelecido para o erro máximo permitido para esses equipamentos (em porcentagem);
- Carga (*Burden*): Valor de impedância referente ao relé conectado nos terminais secundários do TC;
- Corrente de Excitação: Valor eficaz de corrente que circula pelo enrolamento secundário de um TC, quando é aplicada em seus terminais uma tensão senoidal com frequência nominal, estando o enrolamento secundário e outros enrolamentos em aberto;
- Ponto de Joelho da Curva de Excitação: Valor de tensão e corrente correspondentes ao ponto da curva de excitação, a qual o núcleo do TC tem sua maior permeabilidade magnética.

De acordo com os padrões ANSI e ABNT, a corrente fornecida no secundário dos TCs tem o valor nominal de 5 A. Já em países europeus essa corrente é normatizada em 1 A. Esses valores são estabelecidos para a padronização na fabricação de equipamentos de medição e proteção que são conectados no secundário dos TCs.

### **2.3 Relação de Transformação de um TC**

Os TCs possuem uma relação de transformação de corrente (RTC), a qual pode ser expressa em termos dos números de espiras de seus enrolamentos conforme (2.1), onde  $N_1$  e  $N_2$  correspondem às espiras dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente. Vale ressaltar que, a relação entre o número de espiras e as correntes primária e secundária é inversamente proporcional (MAMEDE, 2011).

$$RTC = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.1)$$

Esta mesma relação pode ser demonstrada de acordo com (2.2), expressa em termos das correntes primária e secundária do TC.

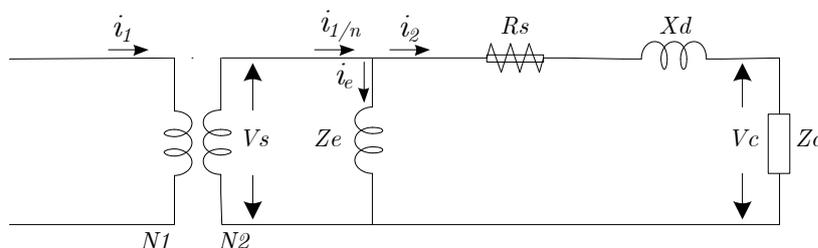
$$I_2 = \frac{I_1}{RTC} \quad (2.2)$$

Os equipamentos de proteção conectados no TC são projetados com valor nominal de 5 A. Com isso, as relações de transformação sempre se dão de um valor específico para 5 Ampères de corrente secundária. Desta forma, a norma NBR 6856 estabelece valores de corrente primária do TC como 5, 20, 30, 60, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 5000, 6000 e 8000 A. No padrão ANSI são determinados como valores para a corrente do enrolamento primário 10, 15, 25, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1200, 3000 e 4000 A (KINDERMANN, 2005).

#### 2.4 Circuito Equivalente de um Transformador de Corrente

A Figura 2.1 mostra o circuito equivalente de um TC e a carga conectada em seus terminais secundários. Neste caso, a impedância de dispersão primária e a parte reativa contida no terminal secundário são desprezadas, já que não afetam no funcionamento do TC (IEEE Std C37.110-2007).

Figura 2.1 - Circuito Equivalente do TC com carga conectada.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 2.1,  $i_1$  representa a corrente nos terminais primários do TC,  $i_1/n$ , a corrente primária refletida para o lado secundário (corrente total no secundário do TC),

$i_e$ , a corrente que flui pelo ramo de magnetização e  $i_2$ , a corrente que circula pela carga. As tensões  $V_S$  e  $V_C$  representam a tensão de excitação secundária e a tensão na carga, respectivamente.  $R_S$  e  $X_d$  são a resistência presente no enrolamento secundário e a reatância de dispersão. As impedâncias  $Z_e$  e  $Z_c$  correspondem, respectivamente, à impedância contida no ramo de magnetização do transformador e a impedância da carga. Já  $N_1$  e  $N_2$  correspondem ao número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, que podem ser representadas pela RTC.

A corrente que circula pelo ramo de magnetização  $i_e$  pode ser obtida pela Equação 2.3, na qual  $i_M$  corresponde à corrente de magnetização e  $i_{Loss}$ , às perdas existentes no núcleo do TC. Além disso, através do circuito equivalente do TC, percebe-se que a corrente  $i_2$ , a qual circula pela carga, pode ser obtida através da Equação 2.4.

$$i_e = i_M + i_{Loss} \quad (2.3)$$

$$i_2 = (i_1/n) - i_e \quad (2.4)$$

Em condições normais de operação, a corrente  $i_e$  tem um valor muito pequeno quando comparada com a corrente secundária total do TC. Sendo assim, o erro que ela causa na corrente que circula pela carga é desprezível. No entanto, existem algumas situações indesejáveis como, por exemplo, curtos-circuitos, que podem provocar a saturação do núcleo do TC. Quando o núcleo está saturado, ocorre um aumento significativo da corrente de magnetização. Com isso, o erro causado na corrente  $i_2$  passa a ser muito maior, resultando em grandes distorções na forma de onda da corrente que circula pela carga do TC. Geralmente, o erro máximo permitido para TCs aplicados em proteção é de 10% (SANTOS, 2015).

## 2.5 Fator de Sobrecorrente do Transformador de Corrente

O Fator de Sobrecorrente (FS) do TC define a relação entre a máxima corrente simétrica de curto-circuito nos terminais primários e a sua corrente nominal, para a qual sua classe de exatidão é mantida, conforme a Equação 2.5 (KINDERMANN, 2005).

$$FS = \frac{I_{\text{Primária curto-circuito}}}{I_{\text{Primária Nominal do TC}}} \quad (2.5)$$

Cada país define o valor de FS de acordo com as normas de padronização. No Brasil, de acordo com a ABNT os valores de FS são 5, 10, 15 e 20, já o padrão ANSI define este valor como 20, sendo este o mais utilizado.

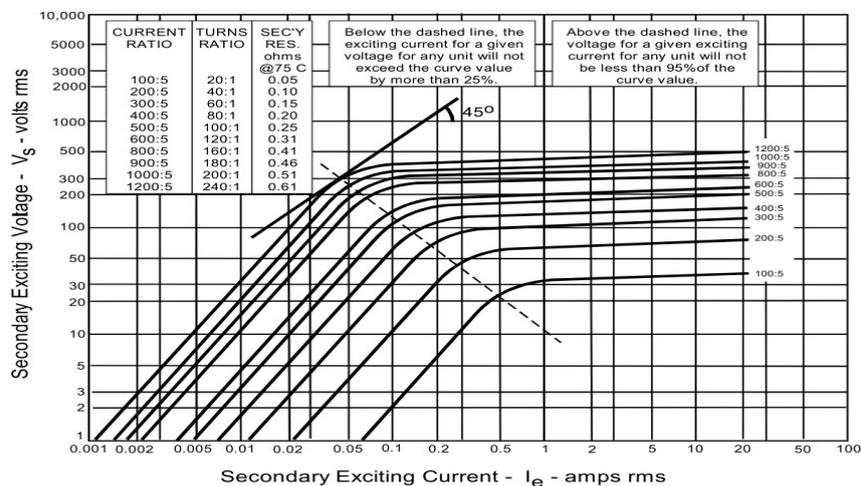
## 2.6 Fator Térmico Nominal

O fator térmico nominal é o número pelo qual a corrente nos terminais primários deve ser multiplicada, de maneira a ser obtida a máxima corrente que pode ser conduzida por um TC durante um tempo contínuo, com a maior carga possível, sem exceder limites de temperatura definidos a partir de uma temperatura ambiente especificada. Segundo a *NBR 6856:2015*, esses fatores são: 1,0 – 1,2 – 1,3 – 1,5 e 2,0. O *IEEE Std C57.13-2016* define os fatores térmicos nominais como: 1,0 – 1,33 – 1,5 – 2,0 – 3,0 e 4,0.

## 2.7 Curvas de Excitação do TC

As características de excitação de um TC podem ser demonstradas através de curvas de excitação. Tais curvas, são feitas em escalas logarítmicas e possuem no eixo das abscissas a corrente que flui pelo núcleo do TC ( $I_e$ ) e, no eixo das ordenadas, a tensão secundária ( $V_s$ ). A Figura 2.2, expõe essas curvas para diversas RTCs de um transformador de corrente.

Figura 2.2 - Curvas de excitação para um TC C400 com diferentes RTCs.



Fonte: IEEE Std. C37.110-2007

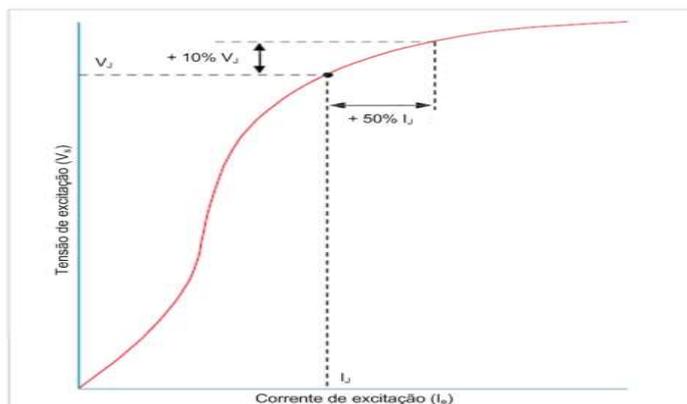
Um aspecto importante para se ressaltar presente na Figura 2.2 é que a relação da tensão secundária e da corrente de magnetização é diretamente proporcional na região linear de operação. Ou seja, conforme a  $V_s$  aumenta, a corrente  $I_e$  também aumenta. Acima do ponto de joelho, o TC opera na região não-linear da curva de excitação, onde, para um incremento de carga ou da corrente secundária,  $V_s$  aumenta e o erro existente no sinal da corrente secundária passa a ser maior devido ao grande incremento na corrente de excitação.

## 2.8 Ponto de Joelho da Curva de Excitação

O ponto de Joelho da curva de excitação (knee-point) é o ponto onde existe a máxima permeabilidade na curva de excitação do TC. Ele é definido, para TCs com núcleo sem entreferro, como o ponto no qual a tangente da curva forma um ângulo de  $45^\circ$  com o eixo da abscissa. Já para TCs com núcleo com entreferro, esse ponto é definido onde a tangente da curva forma um ângulo de  $30^\circ$  com a abscissa (IEEE Std C37.110-2007).

Conforme o *NETWORK PROTECTION & AUTOMATION GUIDE*, de acordo com a norma *IEC 60044-1* desenvolvida posteriormente a especificação *BS 3938*, o ponto de joelho da curva também pode ser definido como o ponto no qual um aumento de 10% da tensão secundária, resulta em um aumento de 50% da corrente de excitação do TC, conforme a Figura 2.3.

Figura 2.3 - Definição do Ponto de Joelho segundo a norma IEC 60044-1.



Fonte: *Network Protection & Automation Guide*.

## 2.9 Classe de Exatidão e Nomenclatura dos TCs

A Classe de Exatidão de um instrumento ou sistema de medição define, através de pré-requisitos metrológicos, limites para erros de medição de tais equipamentos.

A nomenclatura dos TCs geralmente é dada com base em especificações como, por exemplo, classe de exatidão, tipo de utilização, características de magnetização, intensidade de remanescência de fluxo magnético, dentre outras. A ABNT e a ANSI nomeiam os TCs de maneiras diferentes, conforme a demonstração das próximas subseções.

### 2.9.1 Classe de Exatidão e Nomenclatura padrão ABNT

De acordo com a norma *ABNT NBR 6856:2015*, TCs para serviço de proteção devem ter uma classe de exatidão de 5 ou 10. Além disso, a norma especifica que o erro de corrente tem de ser limitado ao seu valor nominal nos terminais primários, para qualquer valor de corrente secundária até 20 vezes a corrente nominal.

Ainda, segundo Kindermann (2005), a ABNT define a classe de exatidão de um TC como a máxima potência aparente (VA), que uma carga conectada ao secundário consome para uma corrente nominal de 5 A.

Segundo o padrão nacional utilizado atualmente, a nomenclatura dos TCs utilizados em serviços de proteção é feita de acordo com (2.6).

$$\left. \begin{array}{c} 2,5 \\ 5 \\ 12,5 \\ 22,5 \\ 25 \\ 45 \\ 50 \\ 90 \\ 100 \\ 200 \end{array} \right\} VA \left\{ \begin{array}{c} 5 \\ 10 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} P \\ PR \\ PX \\ PXR \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 20 \end{array} \right\} \quad (2.6)$$

Onde o primeiro termo corresponde à potência aparente nominal da carga. Em seguida, tem-se a unidade da potência aparente. O terceiro termo é referido como o erro

máximo de sua classe de exatidão (5% ou 10%). O último, refere-se ao FS do TC. Já o quarto termo indica a classe do TC de acordo com o nível de reatância e de remanescência de fluxo magnético em seu núcleo, onde (ABNT NBR 6856:2015):

- P – Indica um Transformador de Corrente para serviços de proteção que não possui limite para o fluxo remanescente, o qual é especificado de acordo com o comportamento de saturação do TC para um curto-circuito simétrico;
- PR – Neste caso indica um TC com limite para o fluxo remanescente o qual é especificado da mesma maneira que o do tipo P;
- PX – Indica um transformador de baixa reatância de dispersão, o qual tem seu desempenho em relação ao sistema de proteção em que está conectado avaliado pelas informações da sua curva de excitação, da resistência secundária, da resistência da carga secundária e da relação do número de espiras;
- PXR – Sua avaliação no sistema de proteção o qual está inserido ocorre da mesma maneira que o do tipo PX, no entanto, neste caso existe um limite para o fluxo remanescente.

### 2.9.2 Classe de Exatidão e Nomenclatura Padrão ANSI

De acordo com a *IEEE Std C57.13-2016*, onde são demonstrados os padrões para instrumentos de transformação, a classe de exatidão de um TC utilizado para fins de proteção é dada de acordo com a Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 - Classe de Exatidão de Transformadores de Corrente de acordo com a classificação dos Relés de Proteção**

Classificação do Relé	Classe de Exatidão	
	Corrente nominal	20 vezes a corrente nominal
Classificação C e T	3%	10%
Classificação X	1%	Definida pelo usuário

Fonte: Adaptado de IEEE Std C37.110-2007.

Na Tabela 2.1, a classificação C cobre a utilização de TCs cujo fluxo de dispersão não é considerável. Portanto, não causam efeitos consideráveis na conversão da corrente de entrada. Já a classificação T cobre TCs nos quais o fluxo de dispersão causa efeitos consideráveis na relação de transformação e por consequência no erro de transformação. Além disso, a classificação dos relés para as classes C e T, é dada de acordo com a tensão terminal que o TC deverá fornecer a uma carga padrão, para uma corrente 20 vezes a corrente nominal, sem exceder o limite de transformação de 10%. A classe X representa relés definidos para uma condição específica de cada usuário.

A nomenclatura dada aos TCs de acordo com o padrão ANSI pode ser observada através de (1.7).

$$\left. \begin{matrix} (C) \\ (K) \\ (T) \end{matrix} \right\} \begin{matrix} 10 \\ 20 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 400 \\ 800 \end{matrix} \quad (2.7)$$

Onde (SANTOS, 2015):

- C – Indica se o fluxo de dispersão pode ser desprezado, além disso, a curva de excitação pode ser utilizada na determinação do desempenho do TC onde o erro de medição pode ser calculado;
- K – Mesma classe que a C, no entanto, diferencia-se no ponto de joelho da curva de excitação o qual deve estar no mínimo em 70% do valor nominal da tensão secundária. TCs de classe K, possuem um núcleo maior que TCs de classe C; e
- T – Indica um TC no qual o erro deve ser determinado através da realização de testes. O fluxo de dispersão para TCs desta classe é significativo, algo que contribui para um aumento no erro de transformação.

## 2.10 Cargas padronizadas para TCs

Na Tabela 2.2, podem ser observadas as cargas padrão para TCs utilizados em esquemas de proteção de acordo com a *IEEE Std C57.13-2016*. Nessa Tabela, são demonstradas as cargas para transformadores de corrente com 5 A nos terminais secundários.

**Tabela 2.2 – Cargas Padrão para TCs com 5 A nos enrolamentos secundários**

Cargas	Designação da Carga	Resistência ( $\Omega$ )	Indutância (mH)	Impedância ( $\Omega$ )	VA (para 5 A)	Fator de Potência	Tensão no Terminal Secundário
TCs para Proteção	B - 0.1	0,09	0,116	0,1	2,5	0,9	10
	B - 0.2	0,18	0,232	0,2	5,0	0,9	20
	B - 0.5	0,45	0,580	0,5	12,5	0,9	50
	B - 1.0	0,50	2,300	1,0	25,0	0,5	100
	B - 2.0	1,00	4,600	2,0	50,0	0,5	200
	B - 4.0	2,00	9,200	4,0	100,0	0,5	400
	B - 8.0	4,00	18,400	8,0	200,0	0,5	800

Fonte: IEEE Std C57.13-2016

## 2.11 Características Construtivas dos TCs

Os transformadores de corrente possuem diferentes tipos de construção para diferentes aplicações. Dentre esses tipos de construção, têm-se como principais (MAMEDE, 2011):

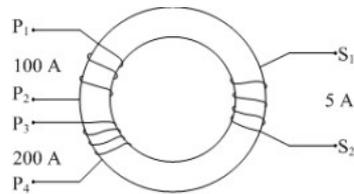
- TC tipo barra – O enrolamento primário é formado por uma barra fixada no núcleo do transformador. São geralmente empregados em painéis de comando de corrente elevada, usados tanto para medição quanto para proteção. Além disso, este tipo de TC é mais utilizado em subestações de média e alta tensões;
- TC tipo enrolado – Neste tipo de construção o enrolamento primário possui uma ou mais espiras envolvendo o núcleo do TC;
- TC tipo janela – O transformador de corrente do tipo janela não possui enrolamento primário em sua construção. Ao invés disso, existe uma abertura

através do núcleo onde passa o condutor que forma o enrolamento primário. Tem grande aplicação em painéis de comando de baixa tensão;

- TC tipo bucha – De características semelhantes ao do TC tipo barra, no entanto, a instalação desses TCs é realizada na bucha dos equipamentos (transformadores, disjuntores, entre outros). Muito utilizado em transformadores de potência e na proteção diferencial;
- TC tipo núcleo dividido – Possui características semelhantes ao TC tipo janela e é utilizado basicamente para a fabricação de equipamentos manuais de medição de corrente e de potência ativa ou reativa;
- TC com vários enrolamentos primários – Como o próprio nome diz, esse tipo de TC possui vários enrolamentos primários montados isoladamente com um enrolamento secundário. As bobinas primárias e secundárias podem ser ligadas em série ou em paralelo, de acordo com a relação de transformação necessária;
- TC com vários núcleos secundários – Possui dois ou mais enrolamentos secundários, cada enrolamento com um núcleo diferente formando, com o enrolamento primário, um único conjunto;
- TC com vários enrolamentos secundários – Constituído por um único núcleo envolvido por um enrolamento primário e diversos enrolamentos secundários que podem ser ligados em série ou em paralelo.

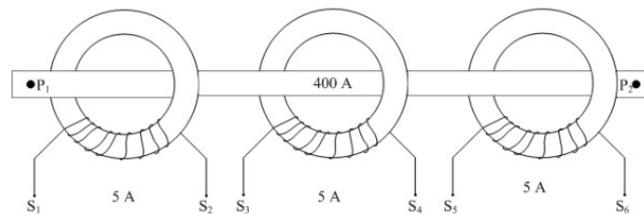
É importante salientar que TCs dos tipos bucha e janela são transformadores das classes C e K, respectivamente, pelo padrão ANSI, indicando que os mesmos possuem baixa reatância. Nas Figuras 2.4, 2.5 e 2.6, podem ser visualizados TCs com vários enrolamentos primários, vários núcleos secundários e vários enrolamentos secundários, respectivamente, os quais possuem múltiplas RTCs.

Figura 2.4 – TC com vários enrolamentos primários.



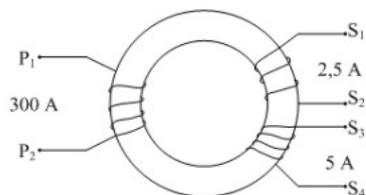
Fonte: SANTOS, 2015.

Figura 2.5 - TC com vários núcleos secundários.



Fonte: SANTOS, 2015.

Figura 2.6 - TC com vários enrolamentos secundários.



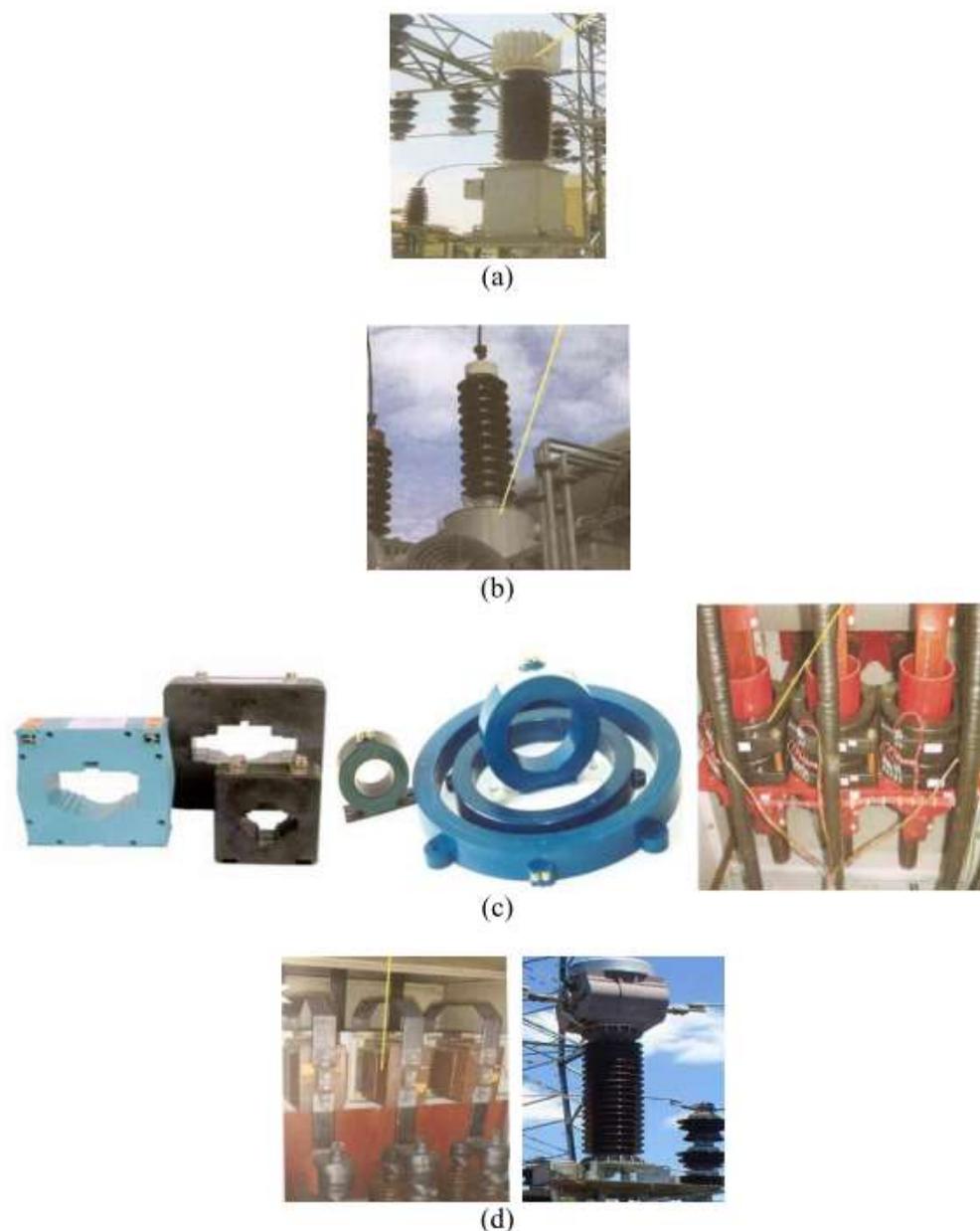
Fonte: SANTOS, 2015.

Dentre os tipos construtivos dos TCs, os mais utilizados para proteção são os dos tipos enrolado, bucha, janela e barra. A Figura 2.7, ilustra transformadores desses modelos.

## 2.12 Especificações de TCs quanto à RTC

Existem basicamente dois critérios utilizados para especificar a relação de transformação dos TCs. Um dos critérios considera a corrente nominal de carga do alimentador e o outro considera o fator de sobrecorrente. Em ambos, são utilizados valores eficazes de corrente simétrica. Para garantir que o TC opere corretamente para a aplicação desejada, ambos os critérios devem ser considerados.

Figura 2.7 – TCs de diferentes tipos construtivos utilizados para proteção. (a) TC do tipo enrolado. (b) TC do tipo bucha. (c) TC do tipo janela. (d) TC do tipo barra.



Fonte: SANTOS, 2015.

### 2.12.1 Critério da Corrente Nominal de Carga do Alimentador

A RTC do TC deve suprir a corrente nominal de carga do alimentador. A expressão (2.8) descreve o critério a ser utilizado. Vale ressaltar, que a escolha através deste critério deve ocorrer em conjunto com o critério do curto-circuito.

$$I_{1TC} > I_{nominal \text{ do alimentador}} \quad (2.8)$$

### 2.12.2 Critério do Curto-Circuito

A relação de transformação do TC também deve satisfazer a condição do curto-circuito imposta pelo fator de sobrecorrente. Através da expressão (2.9), pode ser visualizada que a corrente primária nominal do transformador deve ser maior ou igual a corrente de curto-circuito simétrica máxima dividida pelo F.S.

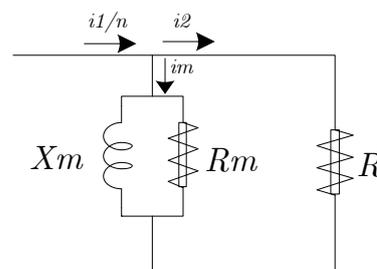
$$I_{1TC} \geq \frac{I_{cc \text{ máx}}}{F.S.} \quad (2.9)$$

### 2.13 Saturação de TCs: Causas e Efeitos

Na Figura 2.8, pode ser observado o circuito equivalente simplificado de um TC. Neste circuito,  $i_1/n$  é a corrente secundária total onde  $n$  é a RTC.  $R_m$ ,  $X_m$  e  $i_m$  fazem parte do ramo de magnetização do circuito e correspondem à resistência, a reatância e a corrente de magnetização, respectivamente. A corrente  $i_2$  corresponde à parcela da corrente secundária que circula pela carga  $R$  do transformador, também denominada de *Burden*.

O circuito equivalente do TC serve como base para as análises acerca desses equipamentos. Através dele, pode ser entendido como ocorrem às distorções dos sinais de corrente que circulam pela carga quando o transformador está saturado.

Figura 2.8 – Circuito equivalente simplificado de um TC



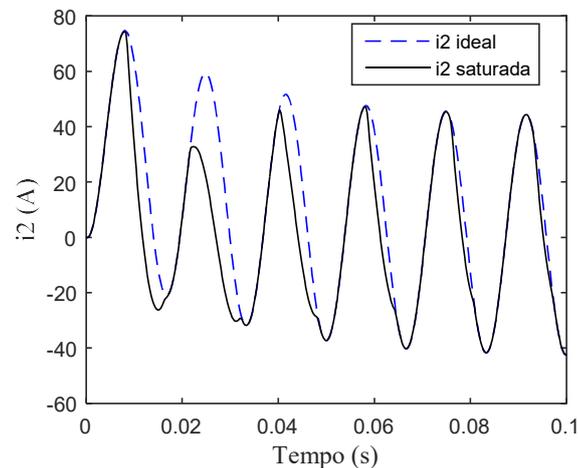
Fonte: Autoria própria.

Através da expressão (2.10), percebe-se que a corrente de magnetização ( $i_m$ ) corresponde a uma parcela da corrente secundária ( $i_2$ ) que é subtraída de  $i_1/n$ . Esta parcela está sempre presente no circuito, causando um erro no sinal da corrente secundária do TC. Entretanto, quando o sistema está operando em condições normais de funcionamento,  $i_m$  tem um valor muito pequeno, pois a impedância deste ramo é elevada. Com isso, o erro existente no sinal de  $i_2$  aproxima-se de zero e pode ser desconsiderado.

$$i_2 = \frac{i_1}{RTC} - i_e \quad (2.10)$$

Porém, quando ocorre à saturação do transformador a impedância de magnetização cai drasticamente. Como resultado disto, grande parte da corrente  $i_1/n$  passa a circular no ramo de magnetização, causando grandes distorções na corrente que circula pela carga do transformador. A Figura 2.9 ilustra a distorção causada na corrente secundária quando o TC encontra-se saturado.

**Figura 2.9 – Formas de onda da corrente secundária para um TC com saturação e sem saturação.**



**Fonte: Autoria própria.**

São diversos os fatores que podem ocasionar o decaimento da impedância do ramo de magnetização. Dentre eles, destacam-se: a componente unidirecional exponencialmente decrescente aplicada aos terminais primários, o incremento na carga do TC, o fluxo

magnético remanescente no núcleo e, também, o mau dimensionamento do transformador para a aplicação a qual ele está inserido.

Existem algumas soluções para esses problemas, dentre elas estão o aumento da RTC do transformador utilizado, o que por consequência provoca um aumento do núcleo, e a utilização de núcleos com entreferro. Entretanto, ambas as opções podem aumentar o custo do TC.

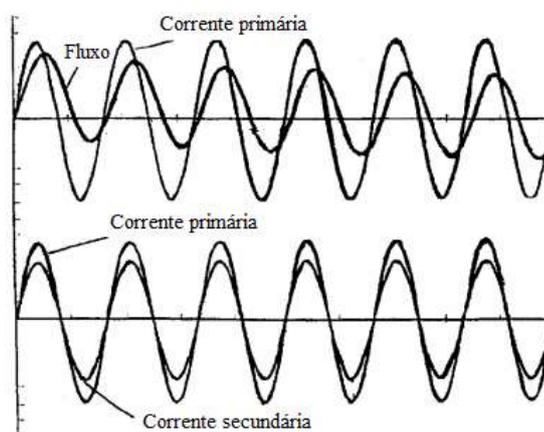
### 2.13.1 Componente DC e sua Influência na Saturação do TC

A componente unidirecional exponencialmente decrescente (componente DC), quando aplicada nos terminais primários do TC, é uma das principais responsáveis pela saturação do núcleo do transformador de corrente, pois essa componente provoca um aumento do ponto de operação na curva de excitação do mesmo.

Além disso, caso o fluxo magnético gerado pela componente DC tenha a mesma polaridade do fluxo remanescente, a saturação do TC pode ocorrer mais rapidamente (IEEE Std C37.110-2007).

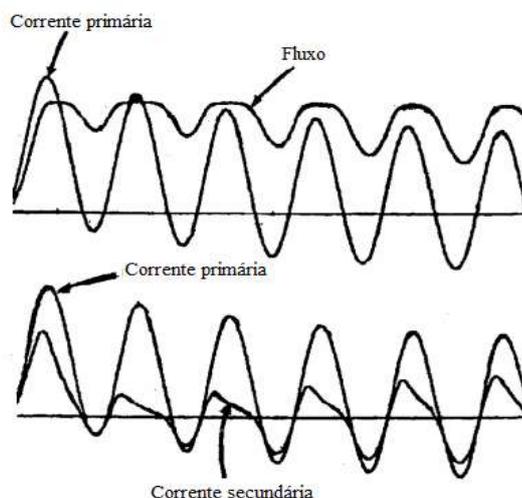
As Figuras 2.10 e 2.11 ilustram a diferença de comportamento do núcleo do TC quando exposto a uma corrente primária sem assimetria e com assimetria, respectivamente. Através dessas Figuras, é possível visualizar como ocorre a saturação do núcleo quando exposto a componente de corrente assimétrica.

Figura 2.10 – Relação entre corrente primária, secundária e fluxo (TC não saturado).



Fonte: Adaptado de IEEE Std C37.110-2007.

Figura 2.11 - Relação entre corrente primária, secundária e fluxo (TC saturado).



Fonte: Adaptado de IEEE Std C37.110-2007.

Como pode ser visto na Figura 2.11, o aumento do fluxo não é instantâneo. No entanto, depois de percorrido certo tempo o incremento de fluxo causa a saturação e por consequência a distorção da corrente secundária. O tempo até o incremento máximo de fluxo é chamado de “*time-to-saturation*” (tempo até a saturação).

### 2.13.2 Critérios para Evitar a Saturação envolvendo a Carga e Tensão de Saturação

O bom dimensionamento da carga de um transformador de corrente é muito importante para a saturação ser evitada. A tensão de saturação ( $V_x$ ) é definida como a tensão sobre o enrolamento secundário do TC, a qual provoca um pico de indução que excede a densidade de fluxo de saturação do núcleo. Os critérios para o dimensionamento de  $V_x$  envolvem a impedância de carga. Tais critérios também devem levar em consideração a possibilidade de existência de fluxo magnético remanescente no núcleo, além de componentes unidirecionais inseridas na corrente que alimenta os terminais primários do transformador. Esses critérios são (IEEE Std C37.110-2007):

- 1) Com o intuito de evitar a saturação causada por correntes simétricas elevadas, a tensão  $V_x$  deve ser maior que o valor da tensão secundária envolvendo a máxima

corrente eficaz secundária e a impedância total de carga, conforme a expressão (2.11).

$$V_x > I_s \cdot Z_s \quad (2.11)$$

Onde:

$I_s$  – Corrente primária dividida pela relação de transformação;

$Z_s$  – Impedância da carga secundária total, incluindo a resistência dos enrolamentos secundários, a reatância de dispersão e a impedância da carga.

- 2) Já para minimizar os efeitos de corrente eficaz assimétrica com carga puramente resistiva, a tensão de saturação deve ser obtida através da expressão (2.12).

$$V_x > I_s \cdot Z_s \cdot \left(1 + \frac{X}{R}\right) \quad (2.12)$$

Onde:

$X$  – Reatância primária do sistema;

$R$  – Resistência até o ponto de falta.

Caso a carga do transformador de corrente tenha uma parcela indutiva, a tensão de saturação é dada de acordo com (2.13).

$$V_x > I_s \cdot Z_s \cdot \left(1 + \frac{X}{R} \cdot \frac{R_s + R_c}{Z_s}\right) \quad (2.13)$$

Ao considerar a existência de um fluxo remanescente, a tensão de saturação é obtida conforme (2.14).

$$V_x > \frac{I_s \cdot Z_s \cdot \left(1 + \frac{X}{R} \cdot \frac{R_s + R_c}{Z_s}\right)}{1 - F_R} \quad (2.14)$$

Onde  $F_R$  é o fluxo remanescente em p.u.

### 2.13.3 Parâmetros que Interferem no Tempo até a Saturação

O tempo até a saturação é o intervalo de tempo durante o qual a corrente secundária do TC é uma réplica fiel da corrente primária. Este intervalo tem relevante importância no dimensionamento de projeto e aplicação de relés de proteção. Existem

diversos parâmetros que interferem nesse intervalo de tempo, dentre eles destacam-se (IEEE Std. C37.110-2007):

- a) Grau de assimetria da corrente de falta: O grau de assimetria da corrente primária quando ocorre uma falta, depende da relação X/R do sistema e do ângulo de incidência de falta. A componente assimétrica provoca um incremento no fluxo existente no núcleo do TC. Ou seja, quanto maior o grau de assimetria, mais rápido o núcleo alcançará o início da saturação.
- b) Magnitude da corrente de falta: A magnitude da corrente assimétrica é proporcional ao incremento de fluxo causado por essa assimetria. Quanto maior for a intensidade de corrente, mais rápido o incremento do fluxo fará com que o TC sature.
- c) Fluxo remanescente no núcleo do TC: O fluxo remanescente poderá somar-se ou subtrair-se com o fluxo produzido pelas correntes presentes no terminal primário do TC, dependendo apenas de suas polaridades relativas. Quando o fluxo residual soma-se ao fluxo gerado, o resultado é um aumento mais veloz no ponto de operação do núcleo do TC. Quando o fluxo residual é muito alto o transformador pode entrar na região de saturação em menos de  $\frac{1}{4}$  de ciclo após a falta.
- d) Impedância do circuito secundário: Sejam TCs com cargas de mesmo fator de potência. Aquele que tiver uma carga com impedância maior irá saturar mais rápido. Isso é causado pois, para a mesma corrente, uma carga com impedância mais elevada demanda um maior valor de tensão e o fluxo magnético é proporcional a esta tensão. Além disso, para duas impedâncias de mesmo módulo, aquela que tiver uma maior parcela indutiva fará com que o transformador demore mais para saturar. Isso ocorre porque a indutância, quando exposta as parcelas contínuas das correntes assimétricas, apresenta uma menor impedância, reduzindo o valor de tensão demandado e, por consequência, o valor do fluxo magnético associado também é reduzido.

- e) Tensão de saturação: A impedância de magnetização de um TC depende da quantidade de material ferromagnético no núcleo. Caso essa impedância seja elevada, maior deverá ser o fluxo para o TC entrar na região de saturação. Isso faz com que a tensão de saturação seja maior e, também, torna o tempo até a saturação mais elevado.
- f) Razão de espiras: Ao aumentar a razão de espiras contidas no núcleo de um TC o fluxo diminui. Com isso, a densidade de fluxo é reduzida e o tempo até a saturação é maior.

#### **2.13.4 Os Efeitos causados pelo Fluxo Remanescente**

O fluxo remanescente ou residual, presente no núcleo de um TC, depende do valor de fluxo existente imediatamente antes da interrupção da corrente no terminal primário. O valor desse fluxo depende do valor da corrente primária simétrica, de sua componente unidirecional e da impedância total do circuito secundário do transformador. Conforme abordado na Seção anterior, o fluxo remanescente, dependendo de sua polaridade, pode levar o TC a saturar mais rapidamente.

Ao ser estabelecido no núcleo do TC, o fluxo remanescente é dissipado em uma velocidade muito lenta. Para reduzir esse fluxo em menos de 10% do fluxo de saturação, deve ser aplicada uma tensão equivalente a 60% da tensão no ponto de joelho. Além disso, o fluxo remanescente permanecerá no núcleo até que o mesmo seja desmagnetizado (IEEE Std C37.110-2007).

Existem diversas maneiras de se controlar o fluxo remanescente, dentre elas destacam-se (SANTOS, 2015):

- o Diferentes quantias de aço no núcleo: Na construção do núcleo de TCs para fins de proteção, são utilizados diversos tipos de materiais, dentre eles, os principais são núcleos laminados a frio, grãos-orientados e aço silício. Tais materiais podem conter um fluxo remanescente de até 80% do valor do fluxo de saturação. De acordo com

os materiais utilizados, a permeabilidade magnética do núcleo pode mudar, influenciando na presença de fluxos remanescentes.

- o Núcleos com entreferro: A presença de entreferro no núcleo de um TC não afeta seu desempenho. Ao contrário disto, tal característica reduz a possibilidade de remanescência e elevam a corrente de magnetização. Transformadores que possuem grandes entreferros em seus núcleos tendem a ter baixa ou nenhuma remanescência magnética.
- o Núcleo com duas magnetizações: Transformadores desse tipo possuem um núcleo constituído de duas seções iguais. Para isso, é feito um arranjo de enrolamentos e necessita a utilização de uma fonte CC para a geração do fluxo. Sendo assim, uma das seções é magnetizada com até 75% da máxima densidade de fluxo e polaridade positiva, já a outra seção é magnetizada com uma polaridade negativa. O TC opera normalmente, no entanto, existe uma anulação dos dois fluxos gerados com polaridades diferentes. Com isso, qualquer remanescência no núcleo do transformador é praticamente inexistente.

### **2.13.5 Os Impactos da Saturação nos Principais Tipos de Proteção**

#### **2.13.5.1 Impactos causados na proteção com Relés de Sobrecorrente**

Os relés digitais de proteção atuam baseados no valor eficaz (RMS) da corrente de falta. Quando o TC satura e o sinal enviado para o relé é distorcido, o valor RMS calculado é menor do que os valores da corrente de falta que deveria ser replicada. O resultado disto é um atraso na atuação dos relés de sobrecorrente (KOJOVIC, 2002).

El-Amin & Al-Abbas (2006) demonstram que relés digitais de sobrecorrente instantâneos podem operar corretamente mesmo quando existe a saturação do TC. No entanto, quando se trata de unidades temporizadas o impacto da saturação é mais severo, dependendo da magnitude do curto-circuito, ou seja, da relação X/R do sistema, da carga conectada nos terminais secundários e do fluxo remanescente presente no núcleo.

### **2.13.5.2 Impactos causados na proteção com Relés de Distância**

A saturação do TC causa uma diferença de fase entre a corrente não saturada no terminal primário e a corrente com distorções no terminal secundário. Essa mudança de fase pode fazer com que a impedância vista pelos relés de distância seja maior, resultando em problemas de subbalcance (MOONEY, 2008).

Ainda, Wannous & Toman (2016) ressaltam o fato de que a impedância medida pelos relés de distância sofre um incremento devido à saturação dos TCs e, também, o tempo de atuação da proteção é maior.

### **2.13.5.3 Impactos causados na proteção com Relés Diferenciais**

O princípio básico da operação de relés diferenciais é calcular a diferença entre a corrente de entrada e a corrente de saída da zona protegida. Caso a corrente diferencial exceda um limite definido, o relé deve atuar. Para faltas externas a zona de proteção, a diferença entre as correntes de entrada e saída deve ser zero. No entanto, os erros causados pela saturação do TC podem tornar este valor diferente de zero, implicando na operação da proteção para faltas externas a zona protegida (RAHMATI, 2011).

WU & YU (2018) destacam a importância do estudo do efeito da saturação do TC na proteção diferencial em linhas de transmissão de parques eólicos. Neste caso específico, existe grande quantidade de componentes harmônicas na corrente que flui pela linha, facilitando, com isso, a saturação do núcleo do transformador.

## **2.14 Considerações Finais**

Neste Capítulo, foram introduzidos os principais aspectos dos transformadores de corrente incluindo a característica de seu circuito equivalente, ponto de joelho da curva de saturação, tipos construtivos e o fenômeno da saturação magnética bem como seus impactos nos principais tipos de proteção.

Além disso, foram comentados aspectos básicos para o dimensionamento de TCs, suas nomenclaturas e as cargas padrão de acordo com diferentes modelos de normas. O

Capítulo seguinte apresenta a proposta para detecção dos intervalos de saturação dos sinais de corrente secundária dos TCs destinados à proteção desenvolvida neste trabalho.

### 3. TÉCNICAS PROPOSTAS PARA A DETECÇÃO DOS INTERVALOS DISTORCIDOS PELA SATURAÇÃO DOS TCs

#### 3.1 Considerações Gerais

As distorções causadas nos sinais de corrente devido à saturação de TCs, podem implicar na má operação dos relés de proteção. Com isso, tais erros colocam em risco a confiabilidade do sistema ao prejudicar os esquemas de proteções aos quais esses equipamentos estão inseridos. No entanto, algoritmos para a detecção e correção desses sinais surgiram para mitigar este problema. Para que a correção do sinal ocorra de maneira correta, a detecção dos intervalos distorcidos deve ser precisa, a fim de evitar atuação indevida da correção e, por consequência, a adição de erros desnecessários ao sinal de corrente (SANTOS, 2011).

Tomando como base as funções-diferença do sinal amostrado proposta por Kang *et al.* (2001), muitos algoritmos foram sugeridos para a detecção dos intervalos de corrente distorcidos pelo efeito da saturação de TCs. Exemplos desses métodos podem ser encontrados em Kang *et al.* (2004), Dashti *et al.* (2007) e Santos *et al.* (2013).

No presente Capítulo, propõem-se duas metodologias para a detecção dos trechos distorcidos. A primeira técnica de detecção é baseada nas funções-diferença do sinal amostrado. Através da terceira função-diferença do sinal, é proposto um limite adaptativo para a detecção dos intervalos de corrente distorcidos, o qual foi obtido a partir do cálculo da média e do desvio padrão através de uma janela de dados dessa função-diferença. Já a segunda, baseia-se no cálculo do ângulo formado entre duas amostras consecutivas do valor absoluto das diferenças entre pontos consecutivos do sinal de corrente, utilizando como critério para detecção um valor de ângulo correspondente ao maior valor verificado até 1/8 de ciclo após a incidência do curto-circuito. Uma descrição mais detalhada dos algoritmos propostos é apresentada nas Seções seguintes.

### 3.2 Detecção da Saturação Baseado nas Funções-Diferença do Sinal Analisado

Para melhor descrever a técnica de detecção proposta nesta pesquisa, que é baseada nas funções-diferença do sinal amostrado, é importante demonstrar a método proposto por Kang et al. (2004). Nele os autores conseguiram identificar que as funções-diferença do sinal amostrado podem sofrer incrementos significativos em seus valores, quando ocorre o início e o fim da saturação do sinal de corrente. As funções-diferença de um sinal podem ser descritas conforme (3.1), (3.2) e (3.3).

$$del1(n) = i_2(n) - i_2(n - 1) \quad (3.1)$$

$$del2(n) = del1(n) - del1(n - 1) \quad (3.2)$$

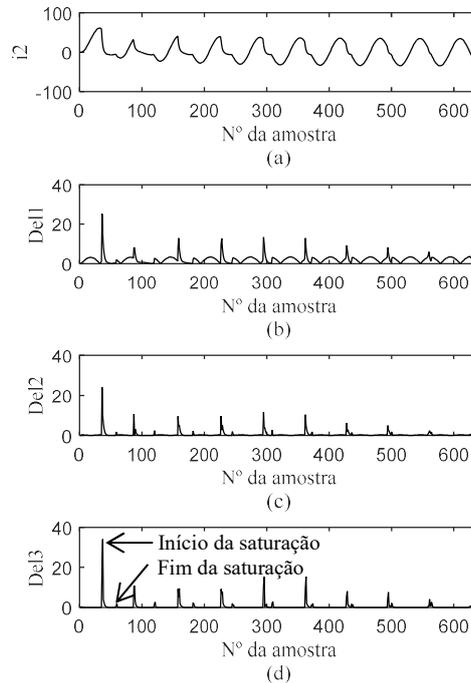
$$del3(n) = del2(n) - del2(n - 1) \quad (3.3)$$

Onde (3.1), (3.2) e (3.3) correspondem à primeira, segunda e terceira função-diferença, respectivamente. Além disso, o índice  $n$  representa a amostra atual do sinal. Na Fig. 3.1, podem ser observadas as três funções-diferença de um sinal saturado genérico, onde é possível perceber os incrementos existentes no início e no fim de cada intervalo de saturação.

Para a implementação desta metodologia, os autores utilizam  $del3$  para a detecção dos intervalos. No entanto, eles destacam que tanto  $del2$  como  $del3$  poderiam ser utilizadas. A expressão (3.4) demonstra o valor limite ( $Th$ ), o qual identifica o maior valor de  $del3$  para que o sinal amostrado esteja livre dos efeitos da saturação.

$$Th = k\sqrt{2}I_{fmax} \left[ 2sen\left(\frac{\pi}{N}\right) \right]^3 \quad (3.4)$$

**Figura 3.1 – Sinal de corrente com distorções causadas por saturação e suas respectivas funções-diferença.**



Fonte: Autoria própria.

Em (3.4),  $k$  é um fator de margem considerando o efeito de um filtro passa-baixa,  $I_{fmax}$  é a máxima corrente de falta esperada e  $N$  é a taxa de amostragem por ciclo. O início e o fim da saturação são obtidos a partir do critério exposto em (3.5).

$$|del3(n)| > Th \quad (3.5)$$

### 3.3 Técnica de Detecção Proposta Baseada na Terceira Função-Diferença do Sinal de Corrente

Em Kang et al. (2004), os autores identificaram que, para alguns casos específicos, o algoritmo perdia o sincronismo na detecção dos intervalos de saturação. Um dos motivos se deve ao fato de que o limite imposto tem um valor constante durante toda amostragem do sinal. Além disso, como pode ser observado na Figura 3.1 (d), o início do intervalo de saturação provoca um incremento maior na terceira função-diferença do que o fim. Em alguns casos, essa diferença pode ser ainda maior, resultando em uma condição

não verdadeira da Expressão 3.5, mesmo tendo chegado o fim do intervalo a ser detectado. Sendo assim, o final da saturação não é detectado e o início do próximo intervalo passa a ser considerado o fim do intervalo anterior, perdendo assim o sincronismo da detecção.

O algoritmo proposto neste trabalho também é fundamentado nas funções-diferença do sinal de corrente amostrado. No entanto, a forma de detecção foi realizada com dois limites adaptativos para a análise de  $del3$ , sendo que um limite detecta o início da saturação e o outro detecta o fim, conforme as Equações 3.6 e 3.7.

$$Th_{inicial}(n) = \mu_{del3}(n) + 3 \cdot \sigma_{del3}(n) \quad (3.6)$$

$$Th_{final}(n) = \mu_{del3}(n) + 2 \cdot \sigma_{del3}(n) \quad (3.7)$$

Em (3.6) e (3.7),  $\mu_{del3}$  e  $\sigma_{del3}$  representam a média e o desvio padrão, respectivamente, calculados com base em uma janela de dados de  $del3$ , onde  $n$  é o valor da amostra atual. Como o fim da saturação implica em um incremento menor em  $del3$ , o valor da janela de dados para o cálculo da média e do desvio padrão correspondente ao limite  $Th_{final}$  é menor (10 amostras), em relação à janela de dados para o cálculo do limite  $Th_{inicial}$  (32 amostras), utilizando uma taxa de 64 amostras/ciclo. Com isso, o limite que determina o fim da saturação é mais detalhado por pegar uma gama menor de valores do sinal amostrado. Além disso, os valores constantes que multiplicam os desvios padrão foram obtidos empiricamente, de modo que o algoritmo correspondesse de forma coerente à detecção dos intervalos nos respectivos instantes de início e fim da saturação.

Para a identificação do início dos trechos saturados do sinal as condições contidas em (3.8), (3.9) e (3.10) devem ser satisfeitas.

$$|del3(n)| > Th_{inicial}(n) \quad (3.8)$$

$$[|del3(n)| - Th_{inicial}(n)] > 0,05 \quad (3.9)$$

$$n > N \quad (3.10)$$

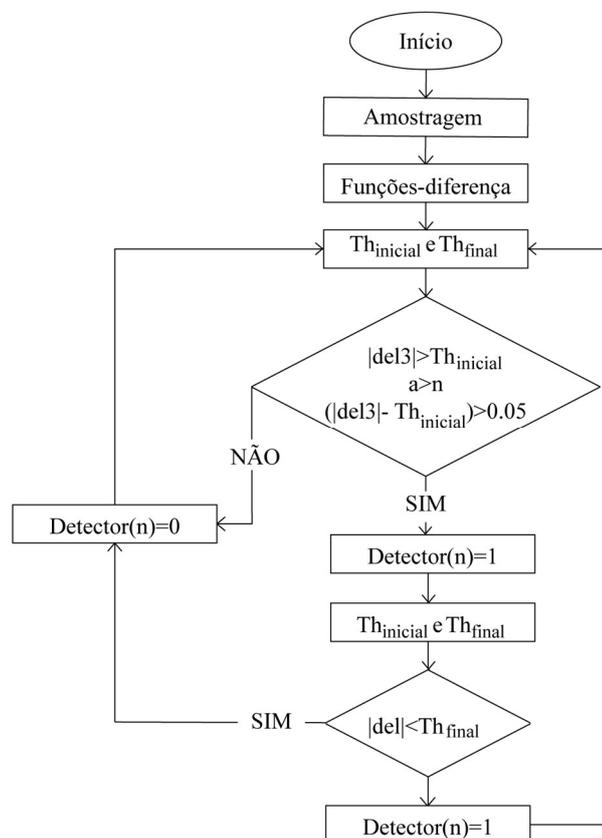
Onde  $n$  é o valor da amostra atual e  $N$  é o número de valores contidos na janela de dados do limite inicial. Além disso, o fator constante contido na condição descrita em (3.9), foi obtido de forma empírica e serve para evitar erros numéricos que podem existir quando os sinais de  $del3$  e de  $Th_{inicial}$  são muito próximos.

Já para a detecção do fim da saturação, apenas o critério exposto em (3.11) deve ser satisfeito.

$$|del3(n)| < Th_{final}(n) \quad (3.11)$$

Sendo assim, a partir dos momentos nos quais os critérios propostos para a identificação do início da saturação são satisfeitos, o método de detecção é ativado e o valor do sinal de detecção muda de zero para um, se mantendo até que o critério do fim da saturação seja satisfeito. Na Figura 3.2, pode ser visualizado o fluxograma do algoritmo proposto.

**Figura 3.2** – Fluxograma do algoritmo proposto para detecção dos intervalos de saturação.



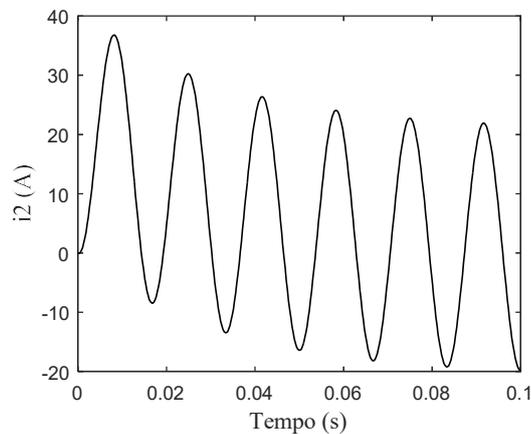
Fonte: Autoria própria.

### 3.4 Técnica de Detecção Proposta Baseada no Ângulo entre Amostras Consecutivas da Primeira Função-Diferença do Sinal de Corrente

O algoritmo proposto é semelhante ao que foi desenvolvido por Santos et. al (2010), o qual leva em consideração, o ângulo formado pelo módulo da diferença entre amostras consecutivas do sinal de corrente.

Na Figura 3.3, pode ser observado um sinal de corrente secundária sem distorções causadas pela saturação do TC. Como pode ser visualizado, o sinal mantém-se em forma senoidal durante toda a amostragem.

**Figura 3.3 - Sinal de corrente secundária de um TC sem saturação.**



**Fonte: Autoria própria.**

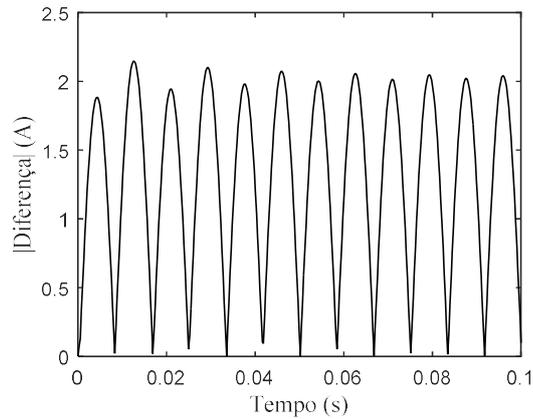
Através do cálculo do módulo da primeira função diferença do sinal contido na Fig.3, realizado conforme (3.12), onde  $n$  corresponde à amostra atual do sinal, obtém-se a curva que pode ser observada na Figura 3.4.

$$\Delta_{i_2}(n) = |i_2(n) - i_2(n - 1)| \quad (3.12)$$

Quando ocorre a saturação do TC, o sinal de corrente perde sua forma senoidal, devido às distorções causadas no sinal, conforme pode ser visualizado na Figura 3.5.

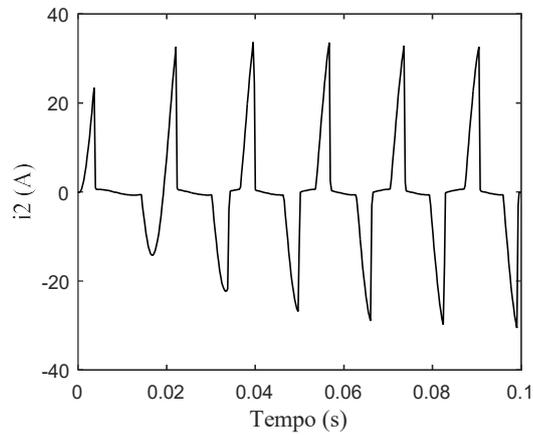
Como pode ser visualizado na Figura 3.5, a cada trecho do sinal distorcido pela saturação do transformador, ocorre uma grande variação no primeiro e no último ponto da região saturada.

Figura 3.4 - Módulo da diferença entre pontos consecutivos do sinal de corrente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.5 - Sinal de corrente secundária de um TC saturado

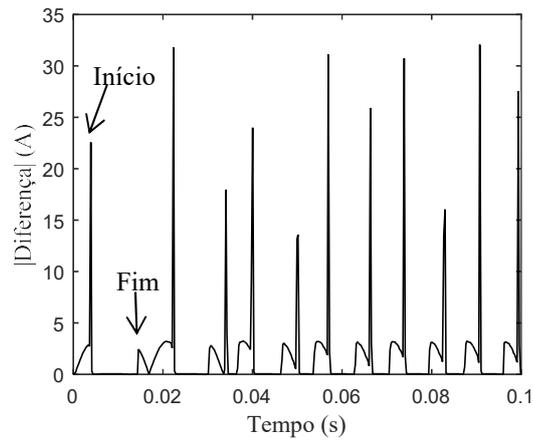


Fonte: Autoria própria.

Deste modo, percebe-se que no início do trecho distorcido pela saturação, ocorrem incrementos significativos, na curva do valor absoluto da diferença dos pontos subsequentes do sinal, conforme a Figura 3.6. Ainda, percebe-se que o fim do trecho distorcido também pode ser identificado.

Como os picos de início e fim do trecho distorcido, destacados na Figura 3.6, demonstram uma grande variação da diferença entre os pontos, o ângulo formado entre esses picos também apresenta um valor elevado. Entretanto, onde o sinal não está distorcido, tais variações são menores e, por consequência disso, o ângulo formado entre elas também é menor.

Figura 3.6 - Módulo da diferença entre pontos consecutivos do sinal de corrente.



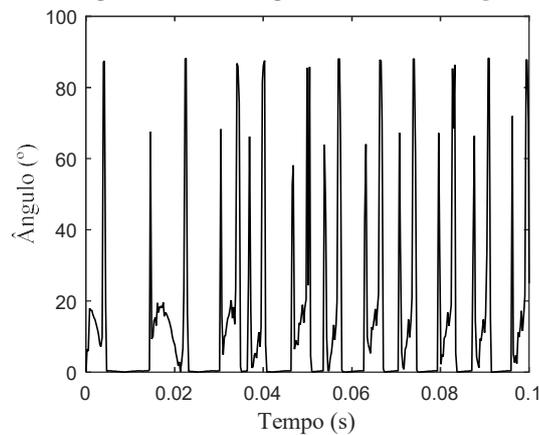
Fonte: Autoria própria.

O ângulo formado entre as amostras consecutivas do sinal de diferenças em módulo pode ser calculado de acordo com (3.13), valendo-se da relação do arco tangente para o triângulo retângulo. Além disso, a distância horizontal entre as amostras das diferenças foi normalizada como igual a um.

$$\alpha (n)^\circ = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta_{i2}(n) - \Delta_{i2}(n-1)}{1} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (3.13)$$

A curva obtida com o cálculo dos ângulos, para o sinal de corrente utilizado anteriormente, pode ser observada na Figura 3.7. Esta é a curva que é utilizada para a detecção dos trechos distorcidos, na qual o início e o fim dos trechos distorcidos podem ser detectados com maior facilidade.

Figura 3.1 - Ângulo das diferenças.



Fonte: Autoria própria.

Além disso, foi verificado que o máximo ângulo calculado desde a incidência da falta até  $1/8$  ciclo após a ocorrência do curto-circuito, corresponde ao maior valor de ângulo para o qual não existe a saturação do TC. Portanto, a partir deste valor, determina-se o valor limítrofe ( $Th$ ) para detecção dos trechos distorcidos, o qual é calculado conforme (3.14), onde  $N$  representa a taxa de amostragem por ciclo. Ainda,  $k$  igual 1 representa a primeira amostra após a ocorrência da falta.

$$Th = \max \left[ \text{angulo} \left( k = 1, \dots, \frac{N}{8} \right) \right] + 0,15 \cdot \max \left[ \text{angulo} \left( k = 1, \dots, \frac{N}{8} \right) \right] \quad (3.14)$$

Em (3.14), o valor constante de 0,15 foi obtido empiricamente, correspondendo a um acréscimo de 15% do valor do máximo ângulo ao  $Th$ , de modo a evitar que ocorram erros na detecção.

Desta forma, quando a curva dos ângulos ultrapassa o valor de  $Th$ , satisfazendo o critério contido em (3.15), a saturação é detectada. Em seguida, o sinal do detector muda de zero para um, mantendo-se em um até que novamente ocorra a ultrapassagem do valor limite.

$$\hat{\text{Angulo}}(n)^\circ > Th \quad (3.15)$$

### 3.5 Considerações Finais

Neste Capítulo, foi exposta a metodologia proposta por Kang *et al.* (2004), que serviu como base para um dos algoritmos propostos nesta pesquisa. Foi explicitado o método elaborado, o qual utiliza um limite adaptativo para a detecção dos intervalos através da terceira função-diferença do sinal amostrado. Além disso, foi descrito uma segunda técnica, elaborada com base no cálculo do ângulo entre amostras consecutivas da primeira função-diferença do sinal. O próximo Capítulo expõe os resultados que foram obtidos através de simulação e da implementação dos algoritmos propostos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Considerações Gerais

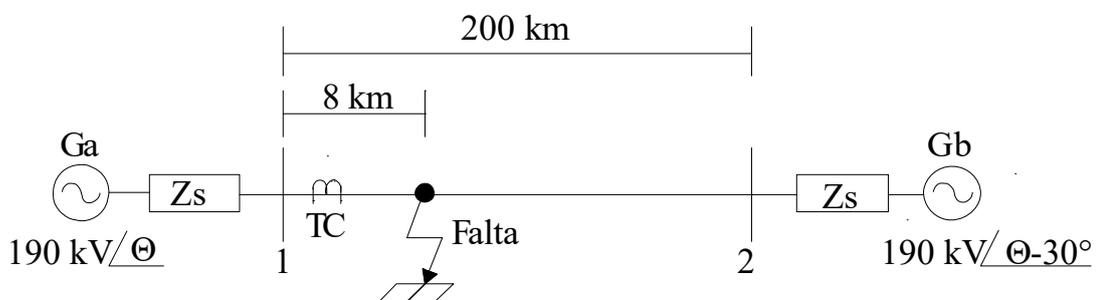
Nesse Capítulo, são apresentados os resultados preliminares, obtidos para testes realizados com as metodologias de detecção propostas nesta pesquisa, conforme descritas no Capítulo 3 (Seção 3.3 e 3.4). Os algoritmos propostos foram implementados no software Matlab®. Os sinais de corrente utilizados nas análises, foram obtidos através de um banco de dados de simulações de curto-circuito no software EMTP-ATP.

Foram simuladas faltas monofásicas e trifásicas. Durante os estudos realizados, constatou-se que em faltas monofásicas apenas o início da saturação foi detectado após algumas amostras. No entanto, isso ocorria em amostras do sinal onde as distorções causadas por saturação eram mínimas e, por conta disso, poderiam ser desconsideradas. Sendo assim, os algoritmos foram programados da seguinte maneira: após detectar o início do trecho distorcido, o final do trecho deve ser procurado por um tempo mínimo de 1/5 de ciclo, mantendo o sinal do detector em 1 enquanto este tempo não for atingido, evitando a detecção antecipada do fim do intervalo de distorção.

### 4.2 Sistema Teste

As simulações no software EMPT-ATP foram feitas de acordo com o sistema teste que pode ser visualizado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Sistema Teste



Fonte: Autoria própria.

Onde  $G_a$  e  $G_b$  representam os geradores conectados nas barras 1 e 2 do sistema. As impedâncias de sequência zero e sequência positiva dos dois geradores são  $3,681 +$

$j24,515 \Omega$  e  $0,819 + j 7,757 \Omega$ , respectivamente. A tensão em valor eficaz de ambos geradores é 190 kV, sendo que o ângulo de fase de  $G_b$  está atrasado em  $30^\circ$  em relação ao ângulo de fase de  $G_a$ . A frequência do sistema é de 60 Hz. A linha de transmissão (LT) tem 200 km de comprimento com impedância de sequência zero igual a  $0,1841 + j1,2258 \Omega/\text{km}$  e impedância de sequência positiva igual a  $0,041 + j0,3878 \Omega/\text{km}$ . A saturação do TC foi obtida com a simulação de uma falta ocorrida a 8 km da barra 1.

O TC utilizado nas simulações foi um C400 com RTC de 2000:5. A indutância e a resistência consideradas no transformador foram de 0,3016 mH e 0,5  $\Omega$ , respectivamente.

Para os testes realizados os valores da carga do TC variaram entre 4  $\Omega$ , 10  $\Omega$  e 100  $\Omega$  puramente resistiva, coerente com os relés digitais que são os mais utilizados atualmente e tem fator de potência igual a 1. A frequência de amostragem dos sinais utilizados é de 3840 Hz, ou seja, 64 amostras/ciclo.

Em diversas etapas das simulações, foi aplicado um fluxo remanescente no núcleo do TC. A representação deste fluxo foi realizada através de um indutor não-linear Tipo-96 e a característica de histerese foi obtida ajustando o joelho da curva em 2,05 A e 1,51 V, com a função HYSDAT do software EMTP, conforme (SANTOS, 2011).

Os valores de corrente analisados foram referentes a fase A do sistema. Além disso, os resultados são expostos em um gráfico com uma forma padrão: em (a) é demonstrada a corrente replicada pelo transformador juntamente com a corrente primária convertida para o lado secundário (corrente ideal a ser reproduzida), em (b) é exposta a atuação do método de detecção em questão, em (c) está o sinal do detector (quando 1 a forma de onda da corrente encontra-se distorcida pela saturação, quando 0 o sinal está sendo reproduzido corretamente) e em (d) existe uma curva calculada a partir da Equação 4.1, a qual demonstra quando o erro percentual entre as duas correntes, sem saturação e com saturação, ultrapassa 10%.

$$Ep = \frac{i_1 \cdot n - i_2}{i_1 \cdot n} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Onde:

$i_1$  – Corrente primária;

$i_2$  – Corrente secundária;

$n$  – Relação de transformação do TC.

### 4.3 Testes Realizados

#### 4.3.1 Teste 1: Falta Trifásica com 0% de Fluxo Remanescente Carga de 4 $\Omega$

Utilizando o modelo de testes presente na Figura 4.1, foi simulado um curto-circuito trifásico em 8 km da LT. Os dois métodos de detecção propostos demonstraram bom desempenho na detecção dos trechos distorcidos para o caso analisado.

##### *4.3.1.1 Resultados para a Detecção da Saturação Através da Terceira Função-Diferença com Ajuste Adaptativo*

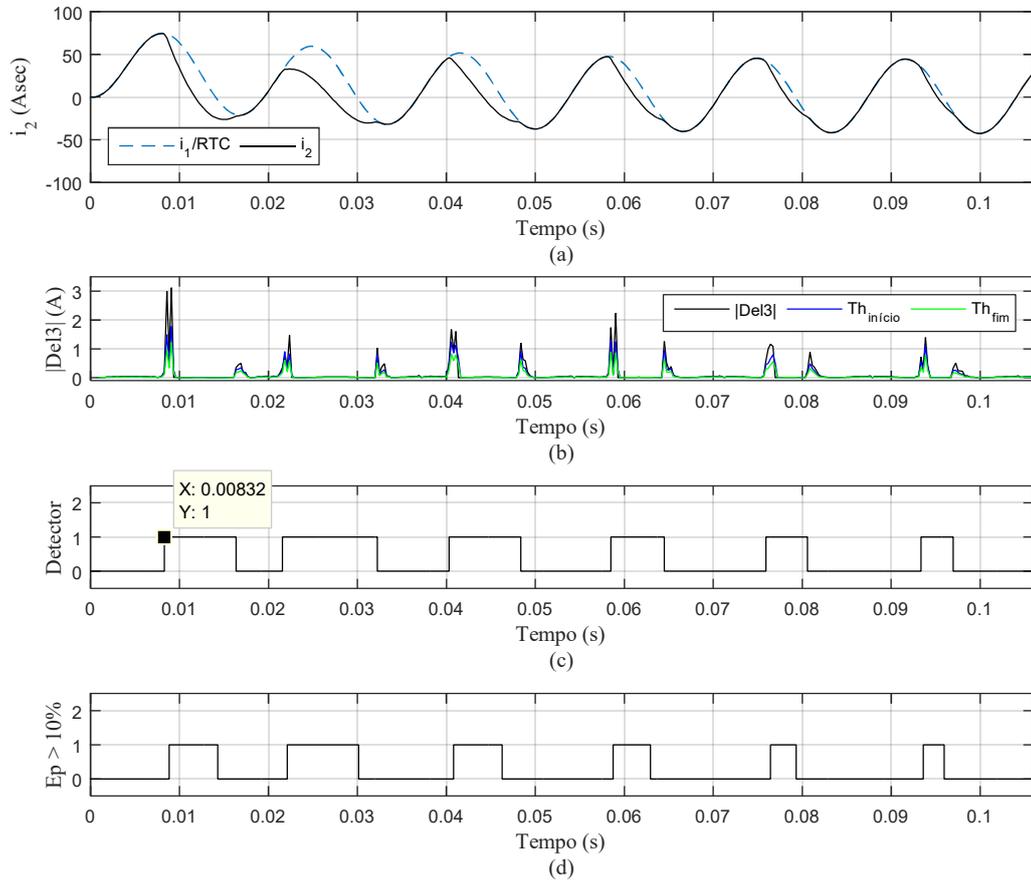
Os resultados da aplicação do método de detecção através da Terceira Função-diferença para este teste podem ser observados na Figura 4.1. Nota-se que, em faltas trifásicas, mesmo sem o incremento de fluxo remanescente, o primeiro trecho distorcido é obtido no primeiro meio ciclo do sinal de corrente após a incidência da falta. Além disso, na Figura 4.1 (b) percebe-se que os incrementos existentes no sinal de *del3*, nesse tipo de curto-circuito, são bastante significativos e correspondem com o início e o fim de um trecho saturado.

Através da Figura 4.1 (c) é possível observar a atuação do método na detecção dos trechos. O primeiro intervalo de saturação detectado teve início em 8,32 ms, além disso, foram detectados 6 intervalos onde o sinal de corrente estava distorcido.

Através da Figura 4.1 (d) percebe-se que os momentos no qual o detector esteve ativado, coincidiram com os instantes nos quais o erro percentual entre a corrente sem distorções e a corrente distorcida ultrapassou 10%. Vale ressaltar, que 10% é o valor mais comum a ser utilizado como erro de máximo de transformação admitido para TCs utilizados em serviços de proteção (IEEE Std C37.110-2007). Ou seja, para o teste

realizado o método proposto mostrou-se eficaz na detecção dos trechos nos quais o erro de transformação ultrapassou 10%.

**Figura 4.1 - Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Terceira função-diferença do sinal e os limites de início e fim do intervalo de saturação. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%.**

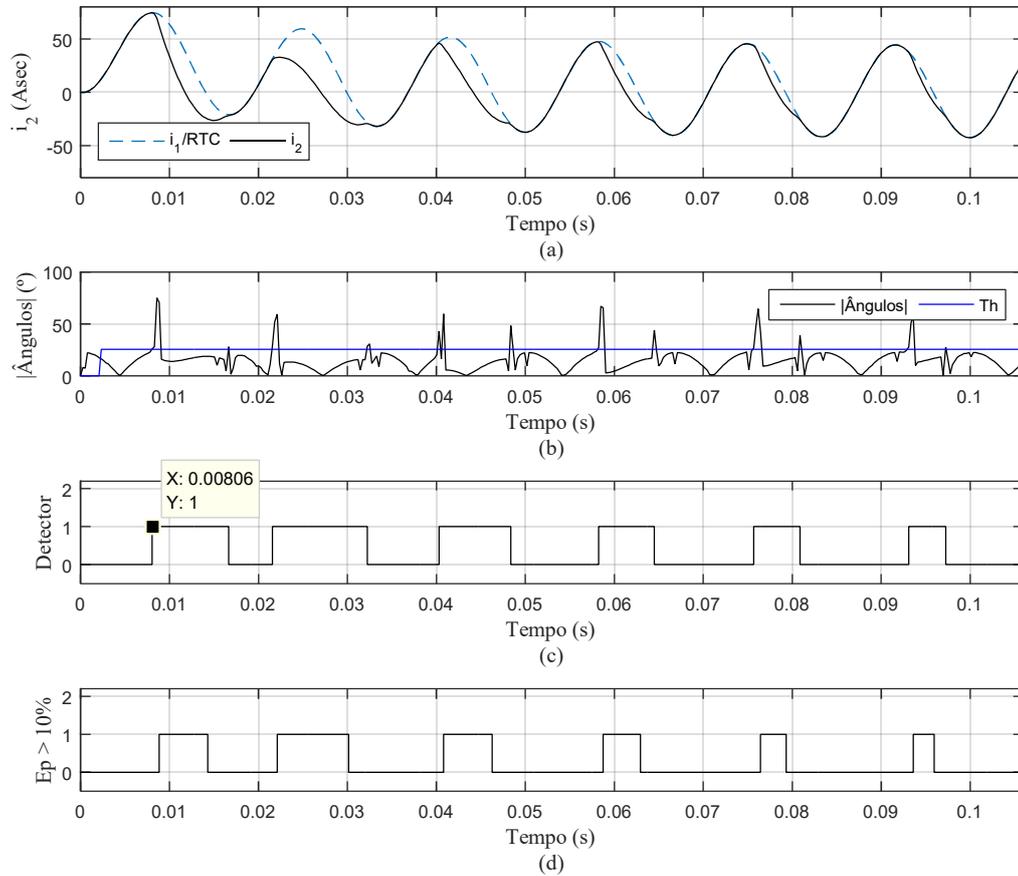


Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.1.2 Resultados para a Detecção da Saturação Através do Ângulo entre Amostras Consecutivas

O presente método de detecção da saturação do TC utiliza o cálculo do ângulo entre amostras consecutivas do sinal reproduzido para detectar os trechos distorcidos. Para o mesmo teste de curto circuito trifásico o algoritmo proposto demonstrou uma boa resposta. A Figura 4.2 expõe os resultados obtidos.

Figura 4.2 - Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Módulo do ângulo das diferenças entre amostras consecutivas. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%.



Fonte: Autoria própria.

Podem ser observados na Figura 4.2 (b) os incrementos existentes no valor do ângulo entre as amostras consecutivas quando ocorre o início e o fim dos trechos distorcidos. Em (c) nota-se também, que os seis trechos distorcidos foram detectados pela metodologia proposta, sendo o início do primeiro trecho detectado em 8,06 ms, ou seja, uma amostra antes em comparação ao método da terceira função-diferença. Vale ressaltar que essa amostra de diferença entre os dois métodos na detecção do primeiro trecho, pode ocorrer por conta de diferenças numéricas existentes nos cálculos realizados por cada proposta, no entanto, apenas uma amostra não é suficiente para comprometer os resultados que foram obtidos.

### 4.3.2 Teste 2: Falta Trifásica com 50% de Fluxo Remanescente e Carga de $4 \Omega$

Como foi destacado na Seção 2.13.4, o fluxo magnético remanescente depende do valor do fluxo existente no núcleo do transformador no instante anterior a interrupção de corrente no terminal primário. Dependendo de sua polaridade, esse fluxo remanescente pode levar o TC a saturar mais rapidamente. O teste realizado nesta Seção, serve justamente para serem observadas as alterações no sinal de corrente reproduzido, quando o transformador já possui um fluxo magnético existente em seu núcleo. Neste caso o sinal passa a sofrer distorções antes de  $\frac{1}{4}$  do primeiro ciclo, tais distorções mostram-se relevantes até o sexto ciclo do sinal.

#### 4.3.2.1 Resultados para a Detecção da Saturação Através da Terceira Função-Diferença com Ajuste Adaptativo

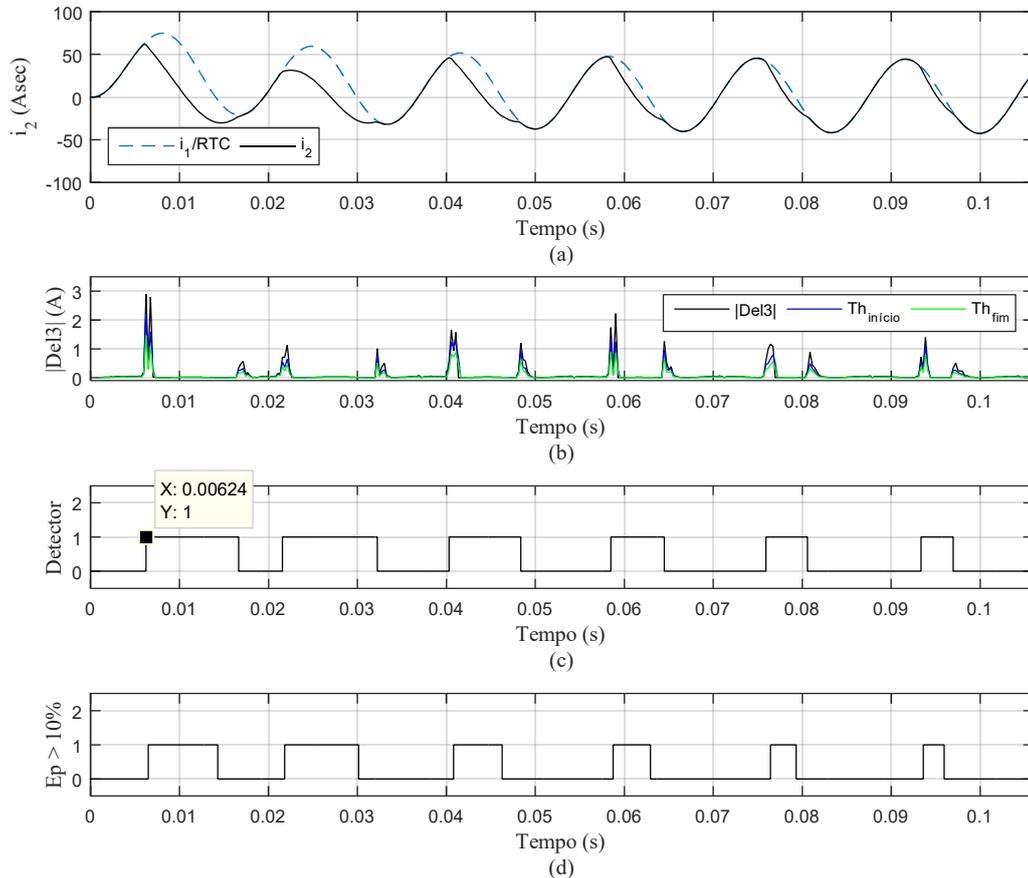
Para este caso simulado, o método que utiliza a terceira função-diferença novamente demonstrou bons resultados. Foram detectados 6 intervalos distorcidos, conforme é possível observar na Figura 4.3. Comparando (b) e (c), verifica-se que os instantes onde ocorrem os incrementos no sinal de *del3* condizem com a alteração de zero para um no estado do detector, indicando os inícios dos respectivos intervalos de saturação.

O primeiro trecho foi detectado em 6,24 ms. Ao observar os gráficos contidos na Figura 4.3 (c) e (d) pode-se concluir que, de fato, o método apurou os intervalos distorcidos de maneira condizente com o gráfico que demonstra quando o erro de transformação ultrapassou os 10%.

Outra comparação interessante de ser realizada é entre os dois testes demonstrados até o momento. No Teste 1, o primeiro trecho detectado pelo método da terceira função-diferença ocorreu em 8,32 ms. Já no Teste 2 para o mesmo tipo de curto-circuito e método de detecção, tendo como diferença na simulação um incremento em 50% do fluxo remanescente, o primeiro trecho distorcido foi observado em 6,24 ms. Ou seja, como

esperado a existência de 50% a mais de fluxo magnético remanescente, gerou uma diferença de 2,08 ms na ocorrência da primeira distorção existente no sinal reproduzido.

**Figura 4.3 – Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Terceira função-diferença do sinal e os limites de início e fim do intervalo de saturação. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%.**



**Fonte: Autoria própria.**

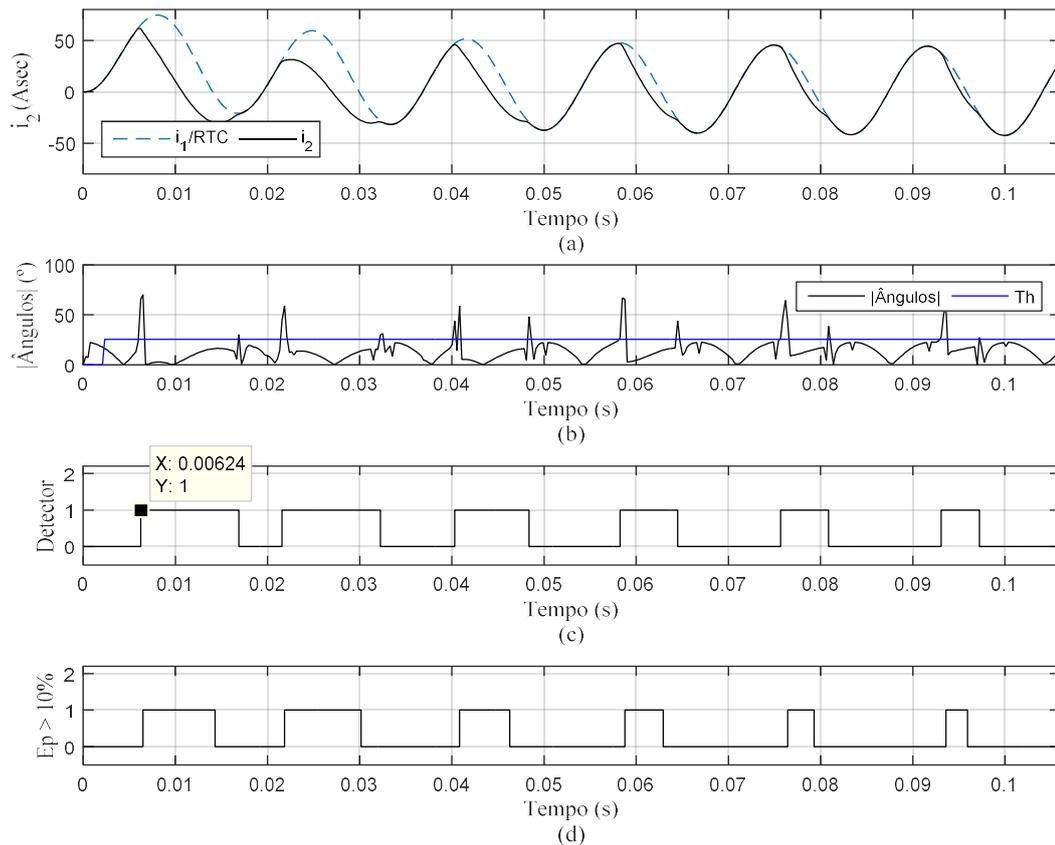
#### 4.3.2.2 Resultados para a Detecção da Saturação Através do Ângulo entre Amostras Consecutivas

Os resultados mostraram-se satisfatórios com a aplicação do algoritmo que identifica a saturação através do ângulo entre amostras consecutivas, como pode ser visualizado através da Figura 4.4.

Como mostra a Figura 4.4 em (c), o primeiro intervalo com distorção do sinal teve seu início em 6,24 ms. Após o primeiro trecho, levando em consideração a comparação entre (c) e (d), onde estão o sinal do detector e o sinal no qual a diferença entre a corrente ideal e a corrente distorcida ultrapassa 10%, respectivamente, outros cinco intervalos

foram detectados de maneira satisfatória. Neste caso, o incremento de fluxo magnético remanescente gerou uma diferença de 1,82 ms na detecção do primeiro trecho em comparação com a aplicação do mesmo método no Teste 1.

**Figura 4.4 - Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Módulo do ângulo das diferenças entre amostras consecutivas. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%.**



Fonte: Autoria própria.

### 4.3.3 Teste 3: Falta Trifásica com 0% de Fluxo Remanescente e Carga de 10 $\Omega$

No terceiro teste realizado, foi mantido o tipo de curto-circuito e não houve incremento no fluxo magnético remanescente. A alteração realizada nesta etapa foi da carga do transformador de corrente, sendo esta alterada de 4  $\Omega$  para 10  $\Omega$ .

#### 4.3.3.1 Resultados para a Detecção da Saturação Através da Terceira Função-Diferença com Ajuste Adaptativo

O método proposto o qual utiliza um limite adaptativo para comparação da terceira função-diferença e obtenção do sinal do detector, apresentou bons resultados na

identificação dos trechos distorcidos. A Figura 4.5 expõe os resultados que foram obtidos.

Algo que é importante de ser destacado é que neste teste o primeiro trecho distorcido foi detectado em 5,98 ms. Em comparação com os outros dois testes realizados, este foi o qual o início das distorções ocorreu com o menor instante, mesmo sem o incremento de fluxo magnético remanescente.

Sendo assim, ao observar a Figura 4.5 (c) e (d), nota-se que os trechos foram detectados de maneira satisfatória. Percebe-se também que o incremento na carga do transformador interfere de maneira mais severa na ocorrência antecipada da distorção do que o incremento de fluxo magnético remanescente, tendo em vista que a diferença do instante na detecção do primeiro trecho entre o Teste 1 e o Teste 3 foi de 2,34 ms e a única modificação existente foi no aumento da carga.

#### *4.3.3.2 Resultados para a Detecção da Saturação Através do Ângulo entre Amostras Consecutivas*

O presente método aplicado ao sinal de corrente obtido pelo teste realizado, apresentou os resultados que podem ser visualizados na Figura 4.6. Novamente, ocorreu a diferença de uma amostra entre a detecção pelo método da função-diferença e pelo método do ângulo consecutivo.

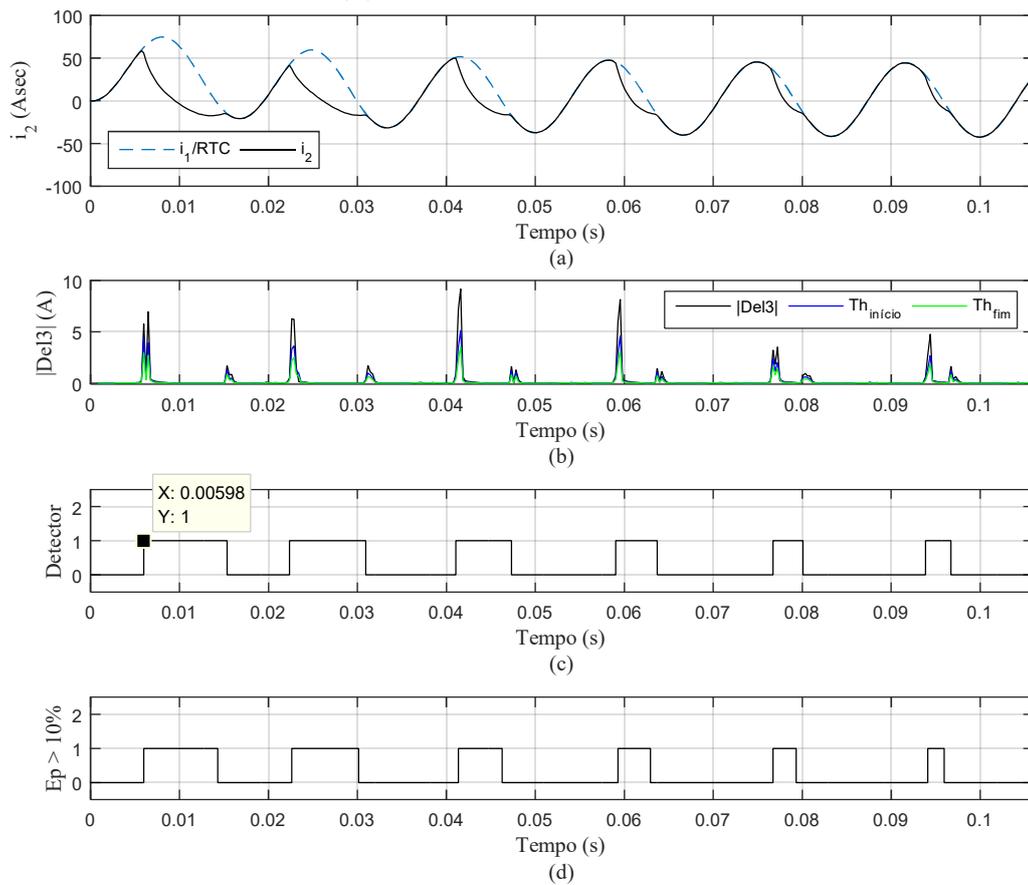
Pode-se observar na Figura 4.6 (c) que o primeiro trecho foi detectado em 6,24 ms. Além disso, foram identificados pelo método outros 5 trechos de distorção, todos eles condizentes com a Figura 4.6 (d), comprovando a eficiência do método para o teste realizado.

#### **4.3.4 Teste 4: Falta Monofásica com 0% de Fluxo Remanescente e Carga de 4 $\Omega$**

Para esse teste foi modificado o tipo de curto-circuito, alterando-se do curto trifásico realizado nos testes anteriores para um curto monofásico. Além disso, foi mantida uma carga puramente resistiva de 4 Ohms. Inicialmente a primeira diferença obtida com a alteração realizada encontra-se no primeiro trecho distorcido de corrente.

Neste caso, o primeiro intervalo ocorre a partir do segundo ciclo do sinal, diferente dos outros testes nos quais isso ocorreu já no primeiro ciclo. As duas metodologias de detecção propostas nesta pesquisa, foram testadas para este caso demonstrando resultados satisfatórios na detecção dos trechos.

**Figura 4.5 – Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Terceira função-diferença do sinal e os limites de início e fim do intervalo de saturação. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%.**



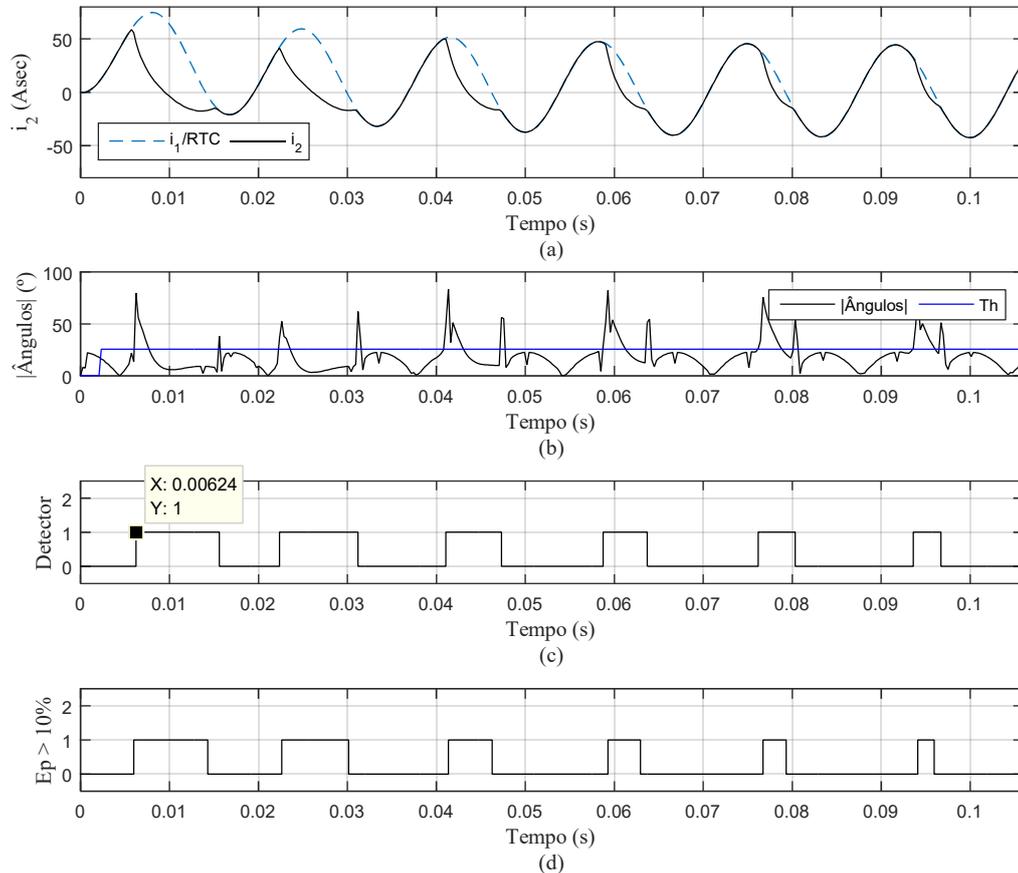
**Fonte: Autoria própria.**

#### **4.3.4.1 Resultados para a Detecção da Saturação Através da Terceira Função-Diferença com Ajuste Adaptativo**

A metodologia que utiliza a terceira função-diferença do sinal com ajuste adaptativo mostrou-se eficaz na detecção dos trechos de corrente distorcidos pela saturação. Os resultados obtidos com a aplicação do método para este teste podem ser visualizados na Figura 4.7, onde as curvas de corrente secundária com e sem distorção estão em presentes em (a), o sinal da terceira função-diferença, bem como os limites de

início e fim de detecção estão presentes em (b) e em (c) é demonstrado o sinal do detector.

**Figura 4.6 – Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Módulo do ângulo das diferenças entre amostras consecutivas. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%.**



**Fonte: Autoria própria.**

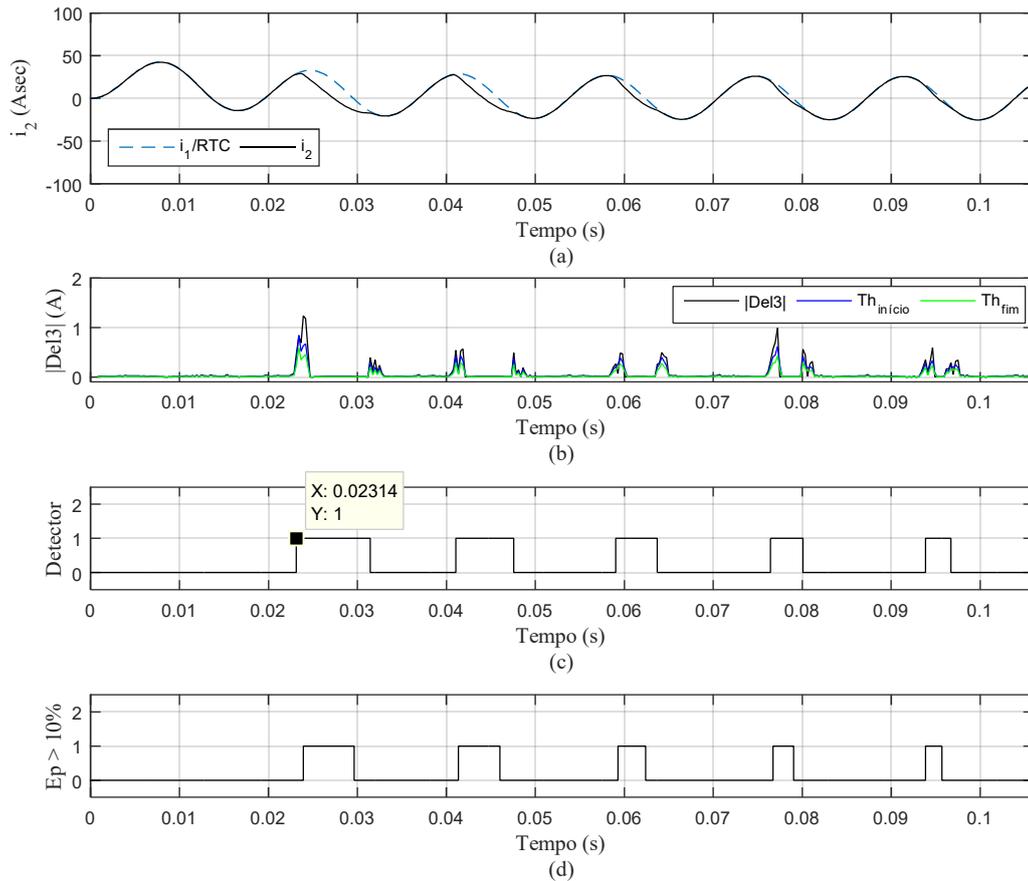
Ainda, na Figura 4.7 (d), é possível observar com maior clareza os pontos onde as distorções na forma de onda da corrente replicada causaram um erro maior que 10% na transformação. Como pode ser observado, o algoritmo obteve êxito na detecção dos intervalos de saturação existentes no sinal, sendo o primeiro trecho detectado a partir de 23,14 ms.

#### 4.3.4.2 Resultados para a Detecção da Saturação Através do Ângulo entre Amostras Consecutivas

Com a aplicação da metodologia descrita na Seção 3.4, foi possível detectar os trechos onde ocorreram distorções do sinal oriundas da saturação do núcleo do

transformador de corrente. Os resultados obtidos com a aplicação deste algoritmo estão contidos na Figura 4.8, onde pode ser observado que, da mesma forma que na Seção anterior, cinco trechos distorcidos foram detectados após a incidência da falta.

**Figura 4.7 – Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Terceira função-diferença do sinal e os limites de início e fim do intervalo de saturação. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%.**



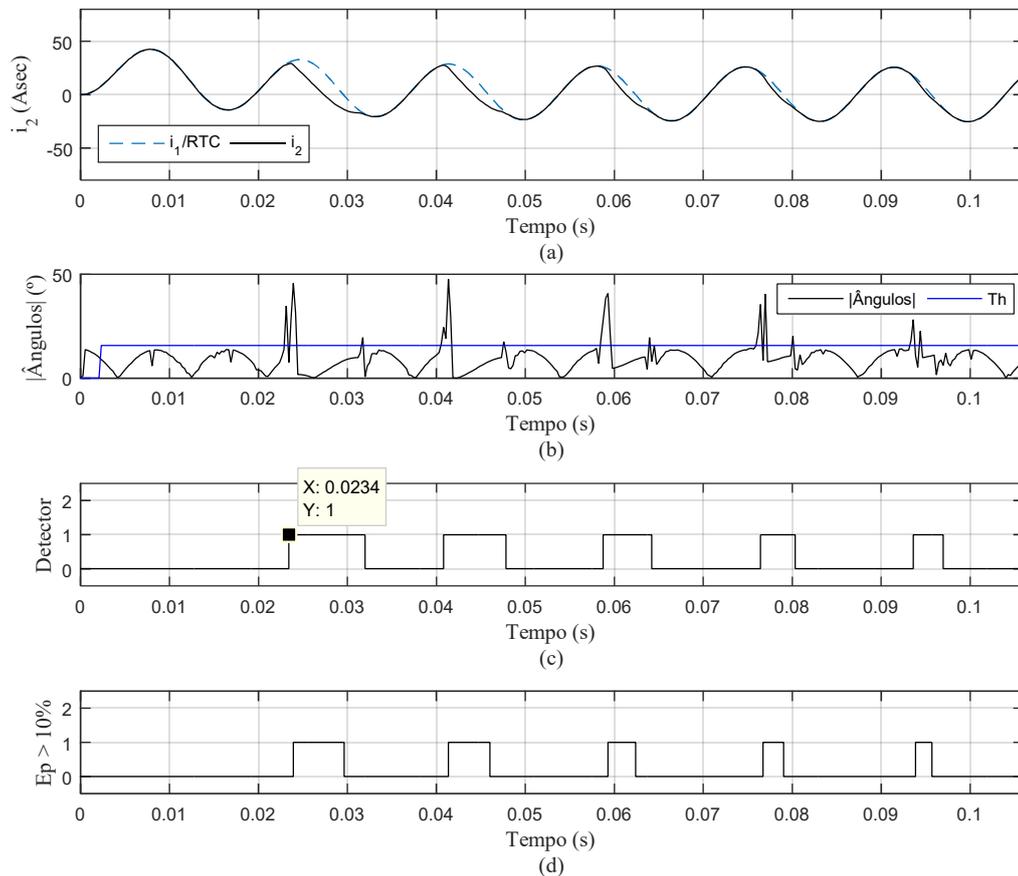
Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.5 Teste 5: Falta Monofásica com 0% de Fluxo Remanescente e Carga de 100 $\Omega$

Para os testes que serão demonstrados nesta seção, foi mantido o tipo de curto-circuito e proposto um aumento na carga do TC de 4 ohms para 100 ohms, tendo em vista que a carga conectada nos terminais secundários do transformador influencia diretamente na saturação do mesmo (como descrito na Seção 2.13.2). A realização desta significativa alteração da carga mostrou-se uma eficiente análise, tendo em vista os

resultados obtidos, facilitando ainda mais o entendimento sobre a direta influência da carga na saturação do equipamento.

**Figura 4.8 – Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Módulo do ângulo das diferenças entre amostras consecutivas. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%..**



Fonte: Autoria própria.

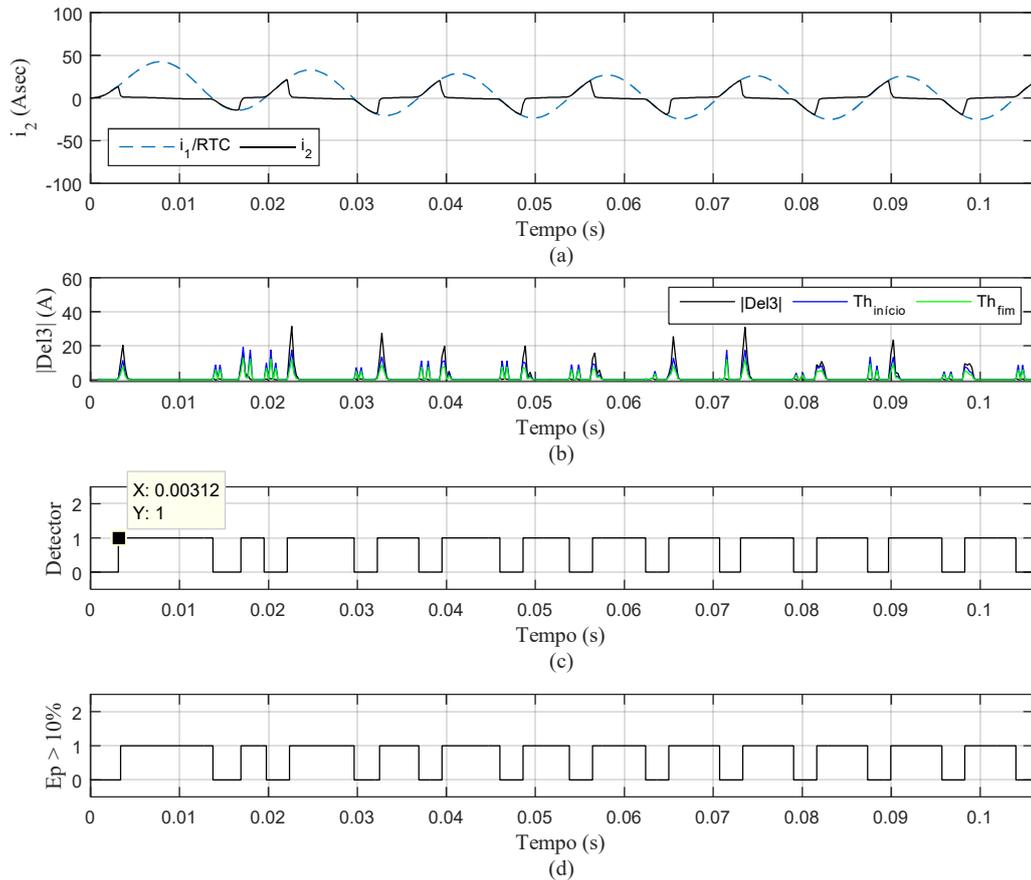
#### 4.3.5.1 Resultados para a Detecção da Saturação Através da Terceira Função-Diferença com Ajuste Adaptativo

A metodologia de detecção apresentada na Seção 3.3, atuou corretamente identificando doze trechos do sinal distorcidos pela influência da saturação magnética do núcleo do transformador. A Figura 4.9 apresenta os resultados obtidos para este teste.

Nota-se através da Figura 4.9 (a), que as distorções causadas no sinal são mais severas para a carga de 100 ohms, quando comparada com os testes realizados com carga de 4 ohms. Com isso, torna-se ainda mais importante à análise acerca da saturação para

um nível de carga mais elevado, afinal, a distorção observada nesta simulação poderia resultar, com maior facilidade, em uma má atuação do sistema de proteção.

**Figura 4.9 - Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Terceira função-diferença do sinal e os limites de início e fim do intervalo de saturação. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%.**



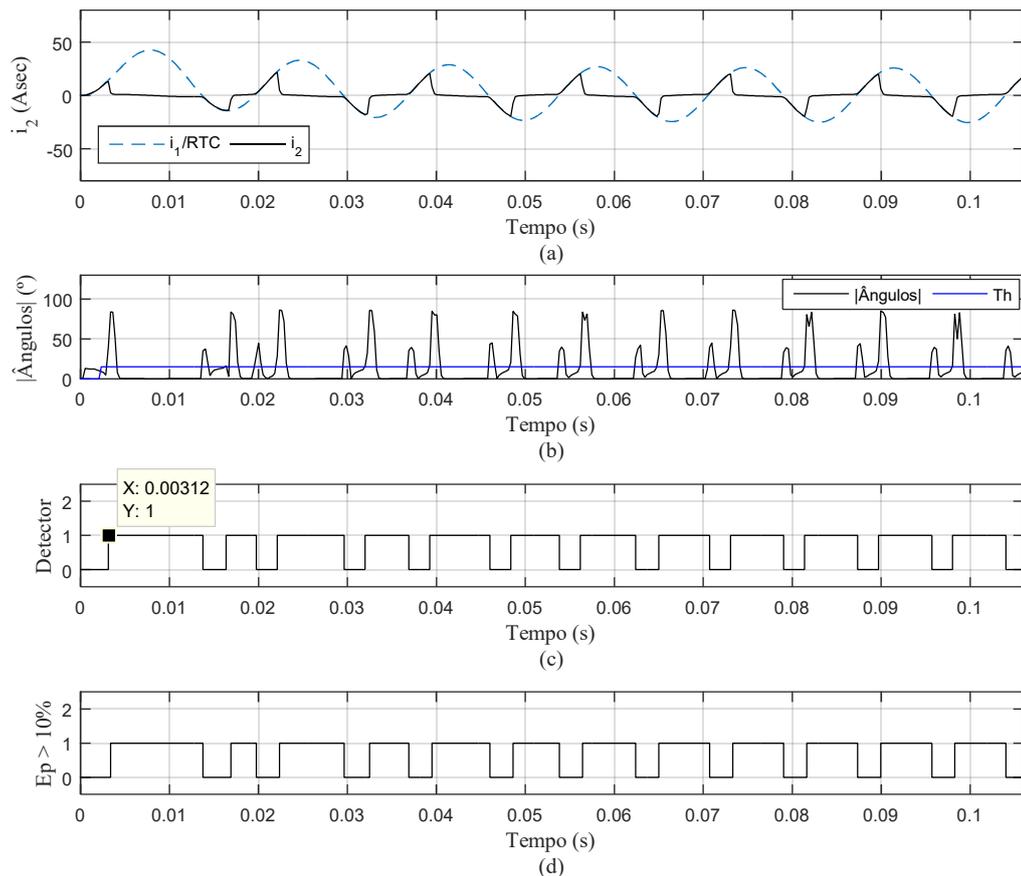
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.3.5.2 Resultados para a Detecção da Saturação Através do Ângulo entre Amostras Consecutivas

A aplicação do algoritmo proposto nesta pesquisa baseado no Ângulo entre Amostras Consecutivas obteve resultados satisfatórios na detecção dos intervalos de saturação. Através da Figura 4.10 (c) e (d), nota-se que os trechos foram detectados de maneira correta.

Foram identificados doze intervalos de distorções, sendo o primeiro intervalo com início em 3,12 ms. Vale ressaltar a ocorrência de dois trechos distorcidos em cada ciclo do sinal de corrente, algo que não ocorreu nos testes realizados anteriormente.

**Figura 4.10 - Detecção da saturação. (a) Corrente secundária ideal e distorcida. (b) Módulo do ângulo das diferenças entre amostras consecutivas. (c) Detector dos intervalos. (d) Erro da transformação maior do que 10%.**



**Fonte: Autoria própria.**

Fica claro, portanto, que o aumento de carga tem influência direta na distorção do sinal. Pois anteriormente, o teste de curto-circuito monofásico demonstrou distorções com início mais tardio com relação aos testes com curto trifásico. No entanto, mesmo simulando um teste com o curto-circuito envolvendo apenas uma fase do sistema a carga elevada gerou uma saturação antecipada e mais severa no sinal reproduzido.

#### 4.4 Análise dos Resultados e Comparação com Outras Metodologias

Através da Seção 4.3, ficou claro que ambos os algoritmos propostos nesta pesquisa demonstraram desempenhos satisfatórios na detecção de trechos distorcidos pela saturação do TC, para diferentes tipos de situações que podem ocorrer no Sistema Elétrico de Potência.

Para melhor comprovar a eficácia dos algoritmos propostos, foi realizada uma comparação dos resultados apresentados com outras metodologias existentes na literatura especializada. Os métodos utilizados para a comparação foram os propostos por Kang et al. (2004) e por Wiszniewski et al. (2008). A preferência pela utilização desses algoritmos ocorreu pois ambos são referências para diversos trabalhos acadêmicos existentes, além de também serem robustos e eficazes na detecção dos intervalos distorcidos.

Os algoritmos foram implementados e utilizados para a aplicação do mesmo sistema teste da Seção 4.1, com os mesmos testes realizados descritos na Seção 4.3 além de outras modificações. Os seguintes critérios foram avaliados: instante de detecção do Início do Trecho (IT), Fim do Trecho (FT) e quantos trechos foram detectados durante o tempo de simulação utilizado. Além disso, foi indicado os instantes do início e do fim dos três primeiros intervalos onde o erro percentual ultrapassou 10% para melhor observar o desempenho dos métodos. As Tabelas de 7.1 a 7.8 dos Apêndices, demonstram as comparações realizadas.

De acordo com as tabelas nas quais foram realizadas as comparações entre os métodos, é possível observar que os dois algoritmos propostos nesta pesquisa demonstraram eficiência na detecção dos trechos tendo, na maioria dos testes, detectado o início do primeiro trecho antecipadamente aos outros algoritmos utilizados durante a análise.

Percebe-se através das tabelas, que em grande parte dos testes realizados, os métodos propostos detectaram o fim dos trechos em um instante maior do que o último instante onde o erro era superior a 10%. Vale ressaltar que essa detecção “atrasada” do

fim do trecho não impacta no desempenho do método. De maneira oposta, detectar o final do trecho antecipadamente pode causar uma perda de sincronismo na detecção, algo que não ocorreu nas análises dos algoritmos propostos nesta pesquisa.

#### **4.5 Considerações Finais**

Neste Capítulo, foram apresentados os dados referentes ao sistema teste, o qual foi utilizado para obtenção dos sinais de corrente analisados nos testes propostos. Além disso, foram expostos os resultados obtidos e uma breve discussão acerca dos mesmos.

Para validar a eficácia do algoritmo proposto, foram realizados diversos testes, incluindo faltas monofásicas e trifásicas, além das variações do fluxo remanescente no núcleo e da carga do TC. Além disso, os métodos propostos foram comparados a outros já existentes e bastante difundidos na literatura especializada.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo abordar os principais aspectos relacionados a saturação dos transformadores de corrente. Através de simulações computacionais, foram demonstrados os impactos que este fenômeno gera em esquemas proteção de Sistemas Elétricos de Potência.

Inicialmente, foram introduzidas as principais motivações para a elaboração desta pesquisa, sendo apresentados diversos estudos existentes na literatura especializada sobre o tema em questão. Posteriormente, foram apresentados os fundamentos dos transformadores de corrente, abordando diversos detalhes relacionados a este equipamento. Ainda, demonstraram-se propostas elaboradas neste estudo para a detecção da saturação de TCs. Por fim, nos resultados e discussões, foram demonstrados os testes realizados através de simulações nos softwares EMTP-ATP e MATLAB.

Foram propostos dois métodos para detecção dos intervalos distorcidos pela saturação dos TCs nas formas de onda de corrente secundária destes dispositivos. Um deles utiliza a terceira função-diferença, com ajuste adaptativo nos limites que identificam o início e o fim do trecho saturado. O outro utiliza o cálculo do ângulo formado entre amostras consecutivas do sinal de corrente para identificar os intervalos distorcidos do sinal.

Foram realizados vários testes para a verificação do comportamento dos algoritmos propostos, dos quais 5 foram detalhados neste trabalho. Tais testes tiveram como objetivo expor os métodos a diferentes eventos que podem ocorrer como, por exemplo, faltas monofásicas e trifásicas. Além disso, durante os testes foram realizadas alterações na carga do transformador e no fluxo magnético remanescente no núcleo do TC.

Para comprovar a correta detecção dos intervalos, foi plotada uma curva referente ao erro percentual entre a corrente distorcida e a corrente que deveria ser replicada

corretamente pelo TC. Além disso, foram realizadas comparações com algoritmos já difundidos na literatura, as quais colaboraram para comprovar a correta atuação das metodologias propostas nesta pesquisa.

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que as técnicas propostas demonstraram robustez e eficácia na detecção dos trechos distorcidos do sinal de corrente. Este fato permite concluir que a aplicação desses algoritmos de detecção aliados a métodos de correção do sinal, pode colaborar para mitigar os efeitos da saturação dos transformadores de corrente nos esquemas de proteção, aumentando a confiabilidade do SEP.

## **5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Com relação ao tema da saturação de transformadores de corrente, sugere-se:

- Aplicação dos métodos de detecção propostos em conjunto com métodos de correção do sinal de corrente; e
- Estudo para a elaboração de outras metodologias de detecção e correção dos trechos distorcidos.

## 6. REFERÊNCIAS

GOES, Alan Ribeiro Gomes. **Modernização da Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 2013. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rj, 2013. Cap. 1.

GUERRA, Francisco das Chagas F.; ARAÚJO, Leandro de Luna; MEDEIROS, Luydi Dandgelo C. de. **Correção Numérica de Correntes Secundárias Distorcidas em Transformadores de Corrente**. Campina Grande, Pb, p.1-6, jan. 2009.

HONG, Ying-yi; WEI, Da-wei. Compensation of Distorted Secondary Current Caused by Saturation and Remanence in a Current Transformer. **IEEE Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 25, n. 1, p.47-54, jan. 2010. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpwrd.2009.2034820>

HOOSHYAR, Ali; SANAYE-PASAND, Majid; EL-SAADANY, Ehab F.. CT Saturation Detection Based on Waveshape Properties of Current Difference Functions. **IEEE Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 28, n. 4, p.2254-2263, out. 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2266799>.

HOSEMANN, G.; STEIGERWALD, H. M.. Modal Saturation Detector for Digital Differential Protection. **IEEE Transactions On Power Delivery**, Erlangen (alemanha), v. 8, n. 3, p.933-938, 1 jul. 1993.

HOSSAIN, Monir et al. A Current Transformer (CT) Saturation Detection Method for Bus Differential Protection. **2018 IEEE**, New Orleans, La, Usa, p.978-982, 2018.

HOSSAIN, Monir; LEEVONGWAT, Ittiphong; RASTGOUFARD, Parviz. A Current Transformer (CT) Saturation Detection Method for Bus Differential Protection. **2018 Clemson University Power Systems Conference (psc)**, Charleston, Sc, Usa, Usa, v. , n. , p.1-5, set. 2018. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/psc.2018.8664064>.

IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE STD C37.110-2007**: IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. 2 ed. New York, Nt: Ieee, 2007. 79 p.

IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE STD C57.13-2016**: IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers. 2 ed. New York, Nt: Ieee, 2016. 96 p.

IX SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE, 9., 2008, Belo Horizonte, Mg. **Saturação de Transformadores de Corrente e suas Implicações em Esquemas Diferenciais de Proteção. Paradigmas e Possíveis Soluções.** Belo Horizonte, Mg: Ix Stpc, 2008.

KANG, Sang-hee; KIM, Min-soo; SHIN, J.h.. A CT Saturation Detection Algorithm Based on Wavelet Transformation. **12th Iet International Conference On Developments In Power System Protection (dpsp 2014)**, Copenhagen, Denmark, jul. 2014. Institution of Engineering and Technology. <http://dx.doi.org/10.1049/cp.2014.0116>.

KANG, Y. C. et al. An Algorithm for Compensating Secondary Currents of Current Transformers. **IEEE Transactions On Power Delivery**, Baltimore, Md, v. 12, n. 1, p.116-124, 01 jan. 1997.

KANG, Y. C.; OK, S. H.; KANG, S. H.. A Novel CT Saturation Detecting Algorithm Unaffected by a Remanent Flux. **Proceedings Of The 2001 Ieee Power Engineering Society Summer Meeting**, Vancouver, Bc, Canada, v. 3, n. 1, p.1324-1327, jul. 2001.

KANG, Young-cheol; OK, S. H.; KANG, S. H.. A CT Saturation Detection Algorithm. **Ieee Transactions On Power Delivery**, Usa, v. 19, n. 1, p.78-85, jan. 2004.

KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** 2. ed. Florianópolis, Sc: Edição do Autor, 2005. 150 p.

KLOCK JUNIOR, Odemar Solano. Saturação de Transformadores de Corrente - Um Estudo de Caso. In: VIII SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE, 5., 2005, Rio de Janeiro - Rj. **Saturação de Transformadores de Corrente - Um Estudo de Caso.** Rio de Janeiro - Rj: Vii Stpc, 2005. v. 5, p. 1 - 5.

KOJOVIC, Lj. A.. Impact of Current Transformer Saturation on Overcurrent Protection Operation. **Proceedings Of The 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, Chicago, Il, Usa, v. 3, n. 1, p.1078-1083, jul. 2002.

KUMAR, Kanhaiya; KUMBHAR, Ganesh B.; MAHAJAN, Satish. A new efficient algorithm to detect Current Transformer saturation. **2016 IEEE Power And Energy Society General Meeting (pesgm)**, Boston, Ma, Usa, jul. 2016. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pesgm.2016.7741583>.

LU, Z.; SMITH, J.s.; WU, Q.h.. Morphological Lifting Scheme for Current Transformer Saturation Detection and Compensation. **IEEE Transactions On Circuits And Systems I: Regular Papers**, [s.l.], v. 55, n. 10, p.3349-3357, nov. 2008. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tcsi.2008.924112>.

MOONEY, Joe. Distance Element Performance Under Conditions of CT Saturation. **2008 61st Annual Conference For Protective Relay Engineers**, College Station, Tx, Usa, p.491-497, abr. 2008. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/cpre.2008.4515075>.

RAHMATI, A.. A directional current differential protection against CT saturation in two sides fed networks. **2011 IEEE/pes Power Systems Conference And Exposition**, Phoenix, Az, Usa, mar. 2011. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/psce.2011.5772523>.

REBIZANT, W.; WISZNIEWSKI, A.; SCHIEL, L.. CT saturation correction based on the estimated CT saturation time constant. **Iet 9th International Conference On Developments In Power Systems Protection (dpsp 2008)**, Berlin, Germany, v. 1, n. 1, p.174-179, abr. 2008. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1049/cp:20080031>.

REBIZANT, Waldemar et al. Differential Relay with Adaptation During Saturation Period of Current Transformers. **Proceedings Of The Iet 9th International Conference On Developments In Power System Protection Dpsp 2008**, Glasgow, Uk, p.174-179, mar. 2008.

SANTOS, E. M. dos et al. CT Saturation Detection Based on the Distance Between Consecutive Points in the Plans Formed by the Secondary Current Samples and Their Difference-Functions. **IEEE Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.29-37, jan. 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpwr.2012.2220382>.

SANTOS, Eduardo Machado dos. **Compensação das formas de onda distorcidas pela saturação de transformadores de corrente com auxílio da estimação de frequência**. 2015. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutor em Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rs, Brasil, 2015.

SANTOS, Eduardo Machado dos. **Métodos para Correção das Distorções da Forma de Onda Secundária Causadas Pela Saturação de Transformadores de Corrente Para Serviço de Proteção**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de

Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rs, Brasil, 2011.

STRINGER, Norman T.. The Effect of Dc Offset on Current Operated Relays. **Proceedings Of The IEEE Industrial And Commercial Power Systems Technical Conference**, Philadelphia, Pa, v. 1, n. 1, p.154-159, 01 jan. 1997.

VANDERLECK, J. M. et al. Transient Response of Current Transformers. **IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems**, New York, N.y., v. -96, n. 6, p.1809-1814, 08 nov. 1976.

VILLAMAGNA, Nicholas; CROSSLEY, Peter A.. A CT Saturation Detection Algorithm Using Symmetrical Components for Current Differential Protection. **IEEE Transactions On Power Delivery**, Belfast, U.k., v. 21, n. 1, p.38-45, jan. 2006.

WANNOUS, Kinan; TOMAN, Petr. The impact of current transformer saturation on the distance protection. **2016 17th International Scientific Conference On Electric Power Engineering (EPE)**, Prague, Czech Republic, maio 2016. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/epe.2016.7521815>.

WISZNIEWSKI, Andrzej; REBIZANT, Waldemar; SCHIEL, Ludwig. Correction of current transformer transient performance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 2, p. 624-632, 2008.

WU, Chuanjian; YU, Qun. Analysis and Countermeasure of Delay of Line Differential Protection Caused by CT Transient Saturation in Faults in Wind Farms. **2018 Chinese Automation Congress (CAC)**, Xi'an, China, China, p.3209-3212, nov. 2018. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/cac.2018.8623558>.

XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 18., 2010, Bonito, Ms. **Deteção do Intervalo de Saturação de Transformadores de Corrente através do Ângulo Entre as Diferenças das Amostras de Corrente Secundária**. Bonito, Ms: Cba, 2010. 8 f.

YANG, L.; DOLLOFF, P. A.; PHADKE, A. G. A microprocessor based bus relay using a current transformer saturation detector. In: **Proceedings of the Twenty-Second Annual North American Power Symposium**. IEEE, 1990. p. 193-202.

YU, Chi-shan. Detection and Correction of Saturated Current Transformer Measurements Using Decaying DC Components. **Ieee Transactions On Power Delivery**, [s.l.], v. 25, n. 3, p.1340-1347, jul. 2010. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpwrd.2010.2045137>.

ZOCHOLL, Stanley E.; BENMOUYAL, Gabriel. How microprocessor Relays Respond to Harmonics, Saturation, and Other Wave Distortions. **Proceedings Of The 24th Annual Western Protective Relay Conference**, Spokane, Wa, Usa, p.1-15, out. 1997.

## APÊNDICES

Tabela 7.1 - Comparação Teste 1

<i>Comparação 1: Falta Monofásica com 0% de Fluxo Remanescente e Carga de <math>4 \Omega</math></i>							
Método	1º Trecho		2º Trecho		3º Trecho		Trechos Detectados
	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	
Terceira Função Diferença	0,02314	0,0312	0,04108	0,04732	0,05902	0,06344	5
Ângulo entre Amostras Consecutivas	0,0234	0,03172	0,04082	0,04758	0,05876	0,06396	5
Função Diferença (Kang et al. 2004)	0,0234	0,03172	0,0416	0,04784	0,05954	0,06396	5
Terceira Derivada (Wiszniewski et al. 2008)	0,0247	0,0325	0,04212	0,04836	0,06006	0,06474	5
Erro Percentual > 10%	0,02392	0,02938	0,04134	0,04576	0,05928	0,06214	5

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7.2 - Comparação Teste 2

<i>Comparação 2: Falta Monofásica com 20% de Fluxo Remanescente e Carga de <math>4 \Omega</math></i>							
Método	1º Trecho		2º Trecho		3º Trecho		Trechos Detectados
	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	
Terceira Função Diferença	0,0104	0,01508	0,02262	0,03146	0,04108	0,04732	5
Ângulo entre Amostras Consecutivas	0,0104	0,01534	0,02262	0,03172	0,04082	0,04758	5
Função Diferença (Kang et al. 2004)	0,01092	0,01534	0,02314	0,03172	0,0416	0,04784	5
Terceira Derivada (Wiszniewski et al. 2008)	0,01144	0,01638	0,02366	0,0325	0,04212	0,04836	5
Erro Percentual > 10%	0,01066	0,01352	0,02288	0,02938	0,04134	0,04576	5

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7.3 - Comparação Teste 4

<i>Comparação 4: Falta Trifásica com 0% de Fluxo Remanescente e Carga de 4 Ω</i>							
Método	1º Trecho		2º Trecho		3º Trecho		Trechos Detectados
	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	
Terceira Função Diferença	0,00832	0,01612	0,02158	0,03198	0,0403	0,0481	6
Ângulo entre Amostras Consecutivas	0,00806	0,01638	0,02158	0,03198	0,0403	0,0481	6
Função Diferença (Kang et al. 2004)	0,00884	0,01664	0,02236	0,03224	0,04082	0,04836	6
Terceira Derivada (Wiszniewski et al. 2008)	0,00936	0,0169	0,02262	0,03302	0,04134	0,04888	6
Erro Percentual > 10%	0,00884	0,01404	0,0221	0,0299	0,04082	0,04602	6

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7.4 - Comparação Teste 5

<i>Comparação 5: Falta Trifásica com 20% de Fluxo Remanescente e Carga de 4 Ω</i>							
Método	1º Trecho		2º Trecho		3º Trecho		Trechos Detectados
	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	
Terceira Função Diferença	0,00754	0,01638	0,02158	0,03198	0,0403	0,0481	6
Ângulo entre Amostras Consecutivas	0,00728	0,01638	0,02158	0,03198	0,0403	0,0481	6
Função Diferença (Kang et al. 2004)	0,00806	0,01664	0,0221	0,03224	0,04082	0,04836	6
Terceira Derivada (Wiszniewski et al. 2008)	0,00858	0,01742	0,02262	0,03302	0,04134	0,04888	6
Erro Percentual > 10%	0,0078	0,01404	0,02184	0,0299	0,04082	0,04602	6

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7.5 - Comparação Teste 6

<i>Comparação 6: Falta Trifásica com 50% de Fluxo Remanescente e Carga de 4 <math>\Omega</math></i>							
Método	1º Trecho		2º Trecho		3º Trecho		Trechos Detectados
	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	
Terceira Função Diferença	0,00624	0,01638	0,02158	0,03198	0,0403	0,0481	6
Ângulo entre Amostras Consecutivas	0,00624	0,01664	0,02158	0,03198	0,0403	0,0481	6
Função Diferença (Kang et al. 2004)	0,0065	0,0169	0,0221	0,03224	0,04082	0,04836	6
Terceira Derivada (Wiszniewski et al. 2008)	0,00702	0,01716	0,02262	0,03302	0,04134	0,04888	6
Erro Percentual > 10%	0,0065	0,01404	0,02184	0,0299	0,04082	0,04602	6

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7.6 - Comparação Teste 7

<i>Comparação 7: Falta Monofásica com 0% de Fluxo Remanescente e Carga de 100 <math>\Omega</math></i>							
Método	1º Trecho		2º Trecho		3º Trecho		Trechos Detectados
	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	
Terceira Função Diferença	0,00312	0,01352	0,0169	0,01924	0,0221	0,02938	12
Ângulo entre Amostras Consecutivas	0,00312	0,01352	0,01638	0,0195	0,0221	0,02938	12
Função Diferença (Kang et al. 2004)	0,00364	0,01404	0,01664	0,01924	0,02262	0,0299	12
Terceira Derivada (Wiszniewski et al. 2008)	0,00442	0,01456	0,0182	0,02054	0,02366	0,03042	12
Erro Percentual > 10%	0,00338	0,01352	0,0169	0,0195	0,02236	0,02938	12

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7.7 - Comparação Teste 8

<i>Comparação 8: Falta Monofásica com 20% de Fluxo Remanescente e Carga de 100 <math>\Omega</math></i>							
Método	1º Trecho		2º Trecho		3º Trecho		Trechos Detectados
	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	
Terceira Função Diferença	0,00286	0,01352	0,0169	0,01924	0,0221	0,02938	12
Ângulo entre Amostras Consecutivas	0,00286	0,01352	0,01638	0,0195	0,0221	0,02938	12
Função Diferença (Kang et al. 2004)	0,00338	0,01404	0,01664	0,01924	0,02262	0,0299	12
Terceira Derivada (Wiszniewski et al. 2008)	0,00416	0,01456	0,0182	0,02054	0,02366	0,03042	12
Erro Percentual > 10%	0,00312	0,01352	0,0169	0,0195	0,02236	0,02938	12

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7.8 - Comparação Teste 9

<i>Comparação 9: Falta Monofásica com 50% de Fluxo Remanescente e Carga de 100 <math>\Omega</math></i>							
Método	1º Trecho		2º Trecho		3º Trecho		Trechos Detectados
	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	IT(s)	FT(s)	
Terceira Função Diferença	0,0026	0,01352	0,0169	0,1924	0,0221	0,02938	12
Ângulo entre Amostras Consecutivas	0,0026	0,01352	0,01638	0,0195	0,0221	0,02938	12
Função Diferença (Kang et al. 2004)	0,00286	0,01404	0,01664	0,01924	0,02262	0,0299	12
Terceira Derivada (Wiszniewski et al. 2008)	0,0039	0,01456	0,0182	0,02054	0,02366	0,03042	12
Erro Percentual > 10%	0,0026	0,01352	0,0169	0,0195	0,02236	0,02938	12

Fonte: Autoria própria.