

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

BRUNA ALVES FELIPE

**DETECÇÃO DA SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE PARA
PROTEÇÃO DE SEP**

**Alegrete
2018**

BRUNA ALVES FELIPE

**DETECÇÃO DA SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE PARA
PROTEÇÃO DE SEP**

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.

Orientador: Dr. Eduardo Machado dos Santos

**Alegrete
2018**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

F315d Felipe, Bruna Alves

Detecção Da Saturação De Transformadores De
Corrente Para Proteção de SEP / Bruna Alves Felipe.
77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA,
2018.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Detecção Da Saturação . 2. Intervalos
Distorcidos. 3. Proteção De SEP. 4. Transformadores
De Corrente. I. Título.

BRUNA ALVES FELIPE

DETECÇÃO DA SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE PARA PROTEÇÃO DE SEP

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.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29 de junho de 2018.

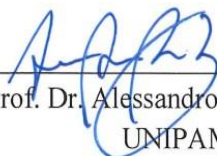
Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
Orientador



Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto
UNIPAMPA



Prof. Dr. Alessandro Botti Benevides
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos, pela confiança, amizade, paciência e principalmente pelos ensinamentos durante a orientação, os quais possibilitaram a realização desse trabalho.

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais Rogério e Alcione, que sempre se fizeram presentes apesar da distância, fornecendo todo suporte que eu precisava durante essa etapa, mais do que meus pais, meus amigos. Às minhas irmãs Naiara e Beatriz, pelo apoio, amizade e conselhos. A tia Márcia, que assim como meus pais também me acompanhou durante todo o curso. A vocês, dedico esse trabalho.

Agradeço à Carolina Fernandes, por me acolher como filha e sempre me tratar como tal durante todos esses anos.

Ao namorado, pela atenção, carinho, compreensão e principalmente paciência durante as fases mais complicadas do curso.

A todos os amigos que a Engenharia me trouxe, a Aline Oliveira, pelas conversas, trabalhos e conselhos os quais, apesar da distância, serão sempre lembrados. A Anna Carolina e aos Engenheiros Joao Paulo e Juliano Fagundes, que, além de amigos, considero irmãos, de curso e de alma. Em especial, agradeço a Bianca Belardony, Fernanda Cazabonet e Naiani Pessoa, que no momento mais decisivo do curso apareceram ou reapareceram na minha vida, com conversas sempre produtivas, conselhos, parceria em todos os momentos e apoio nos períodos mais difíceis. Amizades que vão além da graduação e serão lembradas com carinho.

A todos os professores, colegas e amigos do GESEP, os quais tive a oportunidade de conhecer e conviver durante os últimos anos.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram durante minha graduação.

A Deus por me auxiliar em todos os momentos.

“Aos outros, dou o direito de ser como são. A mim, dou o dever de ser cada dia melhor”.

(Chico Xavier)

RESUMO

O presente trabalho analisa o desempenho de três técnicas utilizadas para detecção de intervalos distorcidos da forma de onda de corrente secundária dos transformadores de corrente (TC), os quais são causados pela saturação do núcleo dos mesmos. Tais métodos dizem respeito às aplicações da Terceira Derivada e da Morfologia Matemática, conforme registrado na literatura especializada. Ainda, propõe-se uma modificação na técnica fundamentada em Morfologia Matemática, na qual o valor limítrofe para a detecção dos intervalos é obtido de forma adaptativa durante o processamento do sinal, em contrapartida ao valor empírico ajustado na aplicação original do método. Dessa forma, aprimorou-se o desempenho da respectiva técnica em comparação à resposta de sua aplicação original e àquela apresentada pelo método da Terceira Derivada. As técnicas foram analisadas em termos de desempenho por caso analisado, a fim de verificar a metodologia mais eficiente quanto à detecção dos trechos distorcidos, os quais coincidem com o intervalo de saturação dos TCs. Dessa forma, foi possível verificar que, em cinco dos oito casos analisados, as metodologias detectaram todos os intervalos de saturação. Entretanto, as técnicas apresentaram diferenças quanto ao desempenho, sendo que foram verificados problemas como atrasos, antecipações e até a não detecção de diversos períodos de saturação, principalmente para as técnicas da Morfologia Matemática, em sua aplicação original, e da Terceira Derivada. Assim, constatou-se que a técnica de detecção proposta atuou melhor do que as demais, apesar de apresentar um pequeno atraso no fim da detecção em alguns casos, tendo em vista que isto não prejudicaria a atuação da lógica de proteção do sistema.

Palavras-Chave: Detecção; Intervalos Distorcidos; Proteção de SEP; Saturação; Transformadores de Corrente.

ABSTRACT

The present work was the process of detecting strings for the detection of distortion of the current of the current transformers (CT), which are generated by the saturation of the core of the same. Specific times for the applications of the Third Derivative and the Mathematical Morphology, as registered in the specialized literature. Also, it is proposed a change in the basis in Mathematical Morphology, in which the boundary value for the detection of the intervals is of adaptive form during the processing of the signal, in counterpart to the empirical value in an original version of the method. In this way, the performance of the technique was improved compared to the response of its original application and the presentation by the Third Derivative method. The tags were analyzed in terms of performance per case analyzed, with coincidences of CT saturation tracking. Thus, it was possible to verify if all five cases were treated, as methodologies detected all the saturation intervals. However, as the options have just come out of the performance, the data were considered as delays, the anticipations and even the non-detection of periods of saturation, mainly for the techniques of Mathematical Morphology, in its first application, and the Third Derivative. Thus, how is the technique of data detection improved, as in any way, although it does not present a perspective of the absence of processes, considering that it is not detrimental to the performance of the system protection logic.

Keywords: Detection; Distorted Intervals; SEP protection; Saturation; Current Transformers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. TCs com relações múltiplas. (a) TC com vários enrolamentos primários. (b) TC com vários enrolamentos secundários. (c) TC com derivação no secundário. (d) TC com vários núcleos secundários.	26
Figura 2. Circuito equivalente do transformador de corrente.	27
Figura 3. Curvas de excitação típicas para TCs classe C com várias relações de transformação.	29
Figura 4. Definição do ponto de joelho pela norma europeia.	31
Figura 5. Pontos de joelho pelas definições da IEEE e da IEC.	31
Figura 6. Tipos Construtivos de TC's para proteção. (a) Tipo enrolado. (b) Tipo bucha. (c) Tipo janela.	36
Figura 7 . Circuito simplificado do transformador de corrente.	37
Figura 8. Formas de onda da corrente secundária para TC saturado e não-saturado.	38
Figura 9. TC não saturado: Relação entre corrente primária e fluxo.	39
Figura 10. TC não saturado: Relação entre corrente primária e fluxo.	40
Figura 11. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.	46
Figura 12. Detecção dos intervalos de saturação por Meio da Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.	48

Figura 13. Detecção dos intervalos de saturação pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.	49
Figura 14. Sistema teste implementado.	51
Figura 15. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.	52
Figura 16. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.	53
Figura 17. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.	54
Figura 18. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.	55
Figura 19. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.	55
Figura 20. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.	56
Figura 21. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.	57

Figura 22. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.	57
Figura 23. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.	58
Figura 24. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.	59
Figura 25. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.	60
Figura 26. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.	60
Figura 27. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.	61
Figura 28. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.	62
Figura 29. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.	62

Figura 30. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.....	63
Figura 31. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.....	64
Figura 32. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.....	64
Figura 33. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.....	65
Figura 34. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.....	66
Figura 35. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.....	66
Figura 36. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.....	67
Figura 37. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.....	68

Figura 38. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.....69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Cargas para TC's com enrolamentos secundários de 5 A34

Tabela 2– Associação entre cargas e TC's de acordo com a classe de tensão35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSI – *American National Standards Institute*

F.S. – Fator de Sobrecorrente

IEC – *International Engineering Consortium*

IEEE – *Institute of Electric and Eletronic Engineers*

LT – Linha de Transmissão

RTC – Relação de Transformação do Transformador de Corrente

SE – *Structuring Element*

SEP – Sistema Elétrico de Potência

Std – *Standard*

TC – Transformador de Corrente

Sumário

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Considerações Gerais.....	18
1.2. Justificativa.....	18
1.3. Objetivos	19
1.4. Revisão Bibliográfica.....	19
1.5. Estrutura do trabalho.....	22
2. FUNDAMENTOS A CERCA DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE.....	24
2.1. Considerações Gerais.....	24
2.2. Modelagem do Transformador de Corrente	24
2.2.1 Transformador de Corrente	24
2.2.2 Circuito Equivalente do Transformador de Corrente	26
2.2.3 Fator de Sobrecorrente (F.S.)	28
2.2.4 Característica de Excitação do TC.....	28
2.2.5 Ponto de Joelho da Curva de Excitação (“ <i>knee-point</i> ”).....	29
2.2.6 Classificação dos Transformadores de Corrente quanto a Exatidão	32
2.2.7 <i>Padrão ABNT</i>	32
2.2.8 <i>Padrão ANSI</i>	32
2.2.9 Cargas Padrão para TCs	34
2.2.10 Tipos Construtivos.....	35
2.3. Especificação de TCs para Relação de Transformação	36
2.3.1. Critério da Corrente Nominal de Carga do Alimentador.....	36
2.3.2. Critério do Curto-Circuito.....	36
2.4. Saturação de TCs	37
2.4.1. Características Dinâmicas.....	38
2.4.2. Efeitos do Fluxo Remanescente	41
2.4.3. Efeitos da Saturação Sobre os Principais Tipos de Proteção	42
2.5. Considerações Finais.....	43
3. MÉTODOS ANALISADOS PARA DETECÇÃO DA SATURAÇÃO EM TCs.....	44
3.1. Considerações Gerais.....	44
3.2. Método de Detecção Utilizando Morfologia Matemática	44
3.3. Método de Detecção por Meio da Terceira Derivada	46
3.4. Método de Detecção Proposto.....	48
3.5. Considerações Finais.....	50

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1. Considerações Gerais.....	51
4.2. Sistema Teste	51
4.3. Casos Analisados	52
4.3.1. Caso 1: Falta Monofásica, 4 Ω de Carga, 4% LT e Fluxo Remanescente de 0%	52
4.3.2. Caso 2: Falta Bifásica-Terra, 4 Ω de Carga, 4% LT e Fluxo Remanescente de 0%	54
4.3.3. Caso 3: Falta Trifásica, 4 Ω de Carga, 4% LT e Fluxo Remanescente de 0%	56
4.3.4. Caso 4: Falta Monofásica, 4 Ω de Carga, 4% LT e Fluxo Remanescente de 80%	58
4.3.5. Caso 5: Falta Bifásica-Terra, 4 Ω de Carga, 4% LT e Fluxo Remanescente de 80% ...	61
4.3.6. Caso 6: Falta Trifásica, 4 Ω de Carga, 4% LT e Fluxo Remanescente de 80%	63
4.3.7. Caso 7: Falta Trifásica, 4 Ω de Carga, 25% LT e Fluxo Remanescente de 0%	65
4.3.8. Caso 8: Falta Trifásica, 4 Ω de Carga, 25% LT e Fluxo Remanescente de 80%	67
4.4. Considerações Finais.....	69
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
5.1. Conclusões	71
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	71
6. REFERÊNCIAS	73

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

Os Transformadores de Corrente (TCs) são essenciais para o desempenho apropriado dos esquemas de proteção, uma vez que devem fornecer, aos equipamentos conectados em seus terminais secundários, uma forma de onda de corrente proporcional ao sinal do primário, em menor escala, permitindo assim acesso aos sinais de corrente da rede. Dessa forma, garantem o isolamento dos equipamentos conectados no terminal secundário do circuito de alta tensão, devendo reproduzir as características da onda primária sem distorções e com a menor defasagem possível, permitindo assim a atuação correta dos dispositivos de proteção (SANTOS, 2011).

Devido ao seu núcleo ser de material ferromagnético, o TC sofre com o fenômeno da saturação, o que provoca distorções nas formas de onda das correntes secundárias do equipamento, causando a atuação indevida ou a não atuação dos dispositivos de proteção (SANTOS, 2011). Nesse contexto, ressalta-se que as principais causas para o fenômeno da saturação são o fluxo remanescente presente no núcleo antes da falta, o mau dimensionamento do equipamento, a carga do TC e as componentes unidirecionais das correntes de curto-circuito. Uma possível solução para esse fenômeno seria o dimensionamento do TC com um núcleo maior, porém, o custo do mesmo aumentaria.

Sendo assim, com a finalidade de detectar e corrigir os intervalos dos sinais de corrente distorcidos pela saturação, ao longo dos anos, diversos estudos sobre tal fenômeno vêm sendo realizados (SANTOS, 2011). Tendo em vista a necessidade em resolver tal problema, o presente trabalho propõe uma nova metodologia para detecção dos intervalos distorcidos por saturação, a qual é comparada com outras duas técnicas recentemente propostas na literatura especializada, as quais são aplicadas para este fim.

1.2. Justificativa

Os TCs são os dispositivos responsáveis por garantir aos equipamentos de proteção o funcionamento adequado dos mesmos. Assim, estudos a cerca da Saturação dos Transformadores de Corrente vêm sendo realizados ao longo dos anos.

Dessa forma, faz-se necessário o entendimento quanto às causas e os efeitos provocados pela saturação dos TCs para os esquemas de proteção, visto que, com a saturação, a corrente primária do TC não é totalmente refletida em seu secundário. Isso pode fazer com que os relés operem indevidamente ou até não operem no tempo desejado, de acordo com a severidade da saturação.

Diversas técnicas de detecção e correção dos intervalos distorcidos da forma de onda da corrente secundária foram implementadas e comparadas. Contudo, em algumas metodologias a detecção ocorre de forma inadequada, o que implica diretamente na correção dos trechos distorcidos, caso as técnicas sejam combinadas.

Dessa forma, são apresentadas neste trabalho três metodologias para detectar os intervalos distorcidos pela saturação do TC, sendo duas delas presentes na literatura e outra, fundamentada em uma das técnicas apresentadas, porém, com uma melhoria no que diz respeito à forma de detecção dos intervalos de saturação, a qual é proposta neste trabalho.

1.3. Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é estudar o fenômeno da saturação, bem como as técnicas de processamento de sinais aplicados para sua detecção.

Por objetivos específicos, tem-se:

- Estudar as técnicas de processamentos de sinais aplicadas para detecção da saturação;
- Estudar o comportamento das mesmas;
- Implementar, pelo menos, duas metodologias propostas na bibliografia;
- Desenvolver e implementar uma nova metodologia que apresente robustez e que seja precisa nos casos em que as técnicas existentes falhem.

1.4. Revisão Bibliográfica

Ao longo dos anos, diversos estudos sobre saturação de TCs, bem como para a detecção da mesma e uma forma de correção para possíveis problemas vêm sendo realizados.

Um dos primeiros estudos sobre o desempenho dos TCs em regime transitório foi feito em 1929, conforme MARSHALL e LANNGUTH (1929), onde foi estudada a corrente de excitação do transformador. Em 1940, conforme WENTZ e

SONNEMANN (1940), os autores analisaram os efeitos no desempenho de TCs utilizados em sistemas de proteção diferencial.

Alguns trabalhos foram publicados entre as décadas de 40 e 60. SEELEY (1943) apresenta um estudo sobre a influência do fluxo residual nos sistemas de proteção diferencial, enquanto SOHIER (1966), apresentou uma otimização teórica fundamentada em um modelo linearizado. O autor também deduziu uma expressão para calcular o tempo aproximado que o TC leva para atingir o estado de saturação.

Diversos estudos foram realizados nos anos 70 a fim de descobrir as causas da saturação bem como, abordar possíveis soluções para os problemas provenientes de tal fenômeno, como em CONNER *et al.* (1975), VANDERLECK *et al.* (1977) e POWELL *et al.* (1979). Em BRADLEY *et al.* (1978), o autor descreve um método para compensar o efeito da componente exponencial (DC) do sinal secundário original, a qual consiste na aplicação de uma corrente exponencial de amplitude controlada no terminal secundário do TC, evitando assim a saturação do transformador.

Com o avanço tecnológico cada vez maior, estudos sobre metodologias capazes de detectar e corrigir os intervalos saturados passaram a ser realizados no fim da década de 80. Nesse contexto, WISZNIEWSKI & SZAFRAN (1989) propuseram um método que determina o instante em que há a primeira saturação do TC e assim, estima os valores da impedância até o ponto de falta sem a correção dos períodos distorcidos. Já no início dos anos 90, YANG *et al.* (1990) apresentaram um detector de saturação através da diferença entre amostras sucessivas do sinal de corrente secundária.

Também, KASZTENNY *et al.* (1997) implementaram três algoritmos para identificação dos intervalos saturados. Em um dos métodos, acréscimos no erro de estimação caracterizavam os intervalos de saturação, ou seja, eram estimados pontos do sinal estudado por uma derivada de segunda ordem, comparando-os assim com o valor amostrado equivalente. Outro método consistia no cálculo da média e mediana de uma janela de dados através de filtros. Onde um sinal de erro era gerado com base na diferença entre tais parâmetros, identificando os períodos saturados por incrementos consideráveis no instante correspondente ao início e fim dos intervalos distorcidos. Por fim, foi apresentada a detecção dos intervalos por meio de uma Rede Neural Artificial.

Além disso, KANG *et al.* (2004) apresentaram uma técnica de detecção que consiste na função-diferença do sinal amostrado, onde os valores da função são incrementados significativamente nos pontos que correspondem ao início e fim de um intervalo de saturação. Ainda nesse ano, os autores combinaram a técnica descrita com a proposta de 1997, a qual consistia na correção do trecho distorcido através da adição de corrente de magnetização ao valor de corrente secundária equivalente.

Destaca-se também que diversas propostas para detectar e corrigir os intervalos de saturação foram apresentadas ao longo dos anos 2000. Entre elas, a utilização da Transformada Wavelet Discreta segundo LI *et al.* (2002) para detectar os intervalos distorcidos, as técnicas de correção através de Mínimos Quadrados expostas por PAN *et al.* (2004) e por EL-NAGGAR & GILANY (2007). Esta última ainda propõe uma detecção dos intervalos de saturação a partir de um filtro de Kalman.

Ainda, REBIZANT & BEJMERT (2007) implementaram um algoritmo genético capaz de otimizar as topologias de Redes Neurais Artificiais (RNAs) para detecção dos intervalos de saturação. Alguns trabalhos que utilizam RNAs para realizar tanto detecção, quanto correções causadas pela saturação podem ser encontrados em YU *et al.* (1999), CUMMINS *et al.* (2000), SAHA *et al.* (2001), ZADEH & PASAND (2004), SEGATO & COURRY (2006), MONARO *et al.* (2010) e SILVA (2012).

Em 2008, técnicas de compensação baseadas na estimação do tempo até a saturação do TC, bem como a combinação de técnicas de detecção e correção dos intervalos são apresentadas em REBIZANT *et al.* (2008), WISZNIEWSKI *et al.* (2008), HONG E CHIAN (2008) e LU *et al.* (2008). No último método mencionado, os autores apresentaram a detecção por meio de operadores da Morfologia Matemática e uma correção através da adição da corrente de magnetização, a qual é estimada para cada intervalo saturado.

Uma detecção através do estudo da razão entre a segunda harmônica e a componente fundamental do sinal de corrente, adicionada à análise da segunda função-diferença do sinal, foi apresentada por STACHEL E SCHEGNER (2009). Além disso, uma proposta para correção desses intervalos, fundamentada no Método Mínimos Quadrados, também foi apresentada.

HONG & WEI (2010), relacionaram um detector através da Transformada Wavelet Discreta com uma correção feita pela associação de uma metodologia

baseada em regressão não-linear e lógica Fuzzy. Ainda, uma técnica de correção que envolve a Transformada Rápida de Fourier foi proposta por OZGONENEL *et al.*(2010).

PEREIRA *et al.* (2012) apresentaram uma nova técnica para efetuar a correção de correntes distorcidas no secundário dos TCs utilizados no serviço de proteção. Essa técnica se baseia na integração da tensão em um enrolamento terciário fazendo com que a corrente de magnetização seja determinada através da curva de saturação do núcleo e somada à corrente secundária distorcida. Dessa forma, a correção da corrente secundária depende da determinação do fluxo inicial após a detecção da saturação, onde o mesmo é medido por um integrador analógico em um intervalo de tempo.

Ainda, uma nova técnica de detecção que utiliza a primeira função-diferença da resposta de um filtro de Lanczos foi proposta em SCHETTINO (2012). Além disso, o autor propôs uma compensação da saturação utilizando um método de estimação para modelos lineares.

Por fim, destaca-se o trabalho de SCHETTINO (2015), o qual apresentou técnicas de processamento de sinais baseadas no filtro diferenciador de segunda ordem de Savitzky-Golay para detectar os intervalos distorcidos e não distorcidos pela saturação. A fim de corrigir o sinal de corrente secundária, foi efetuado um processo de estimação fundamentado no critério dos mínimos quadrados. O autor ainda analisou e desenvolveu meios adaptativos para atenuar as influências do ruído e dos desvios de frequência de operação do SEP.

1.5. Estrutura do trabalho

No Capítulo 2, são expostos os fundamentos a cerca dos TCs, com suas principais características quanto a modelagem, especificação, saturação, discutindo as causas da mesma, bem como as principais consequências para a proteção de SEP.

Os métodos de detecção dos intervalos distorcidos devido à saturação são apresentados no Capítulo 3.

No Capítulo 4, são descritos os resultados alcançados através de cada método utilizado, bem como é descrita a representação do sistema teste utilizado para a obtenção dos sinais de corrente secundária, feito por meio de simulações computacionais para diferentes tipos de faltas.

Por fim, o Capítulo 5 aborda as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTOS A CERCA DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE

2.1. Considerações Gerais

O Transformador de Corrente é o dispositivo que desempenha função indispensável nos esquemas de proteção, fazendo necessário o conhecimento dos principais conceitos que abrangem o dimensionamento e a operação desses equipamentos, principalmente quanto ao fenômeno da saturação. Desta forma, nesse capítulo, são abordados os principais conceitos dos TCs, envolvendo as causas e os efeitos da saturação nos dispositivos de proteção. Parâmetros para modelagem e especificação de TCs também são apresentados.

2.2. Modelagem do Transformador de Corrente

2.2.1 Transformador de Corrente

Segundo o IEEE Std C37.110-2007, um TC, possui principalmente três finalidades:

- Isolar os dispositivos conectados em seu secundário do circuito de alta tensão;
- Fornecer em seu secundário uma forma de onda de corrente proporcional a do primário;
- Fornecer no secundário uma corrente em níveis aceitáveis aos dispositivos a ele conectados.

O enrolamento primário desses equipamentos deve ser conectado em série com o sistema de potência e as cargas do TC (relés) devem ser conectadas em série com os terminais secundários.

Com o objetivo de padronizar os equipamentos de medição e proteção, o TC fornece em seu secundário uma corrente nominal de 5 A (Padrões ANSI e ABNT). Na Europa, a corrente secundária nominal é normatizada em 1 A, apresentando valores de corrente primária divididas por cinco (SANTOS, 2011).

A Relação de Transformação de um TC (RTC) pode ser expressa pela razão entre as espiras do secundário e do primário, de acordo com (1).

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

A RTC ainda pode ser demonstrada de acordo com as correntes nominais do primário e secundário conforme (2).

$$RTC = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \cdot \frac{5}{5} = \frac{I_{1nom}}{5} \quad (2)$$

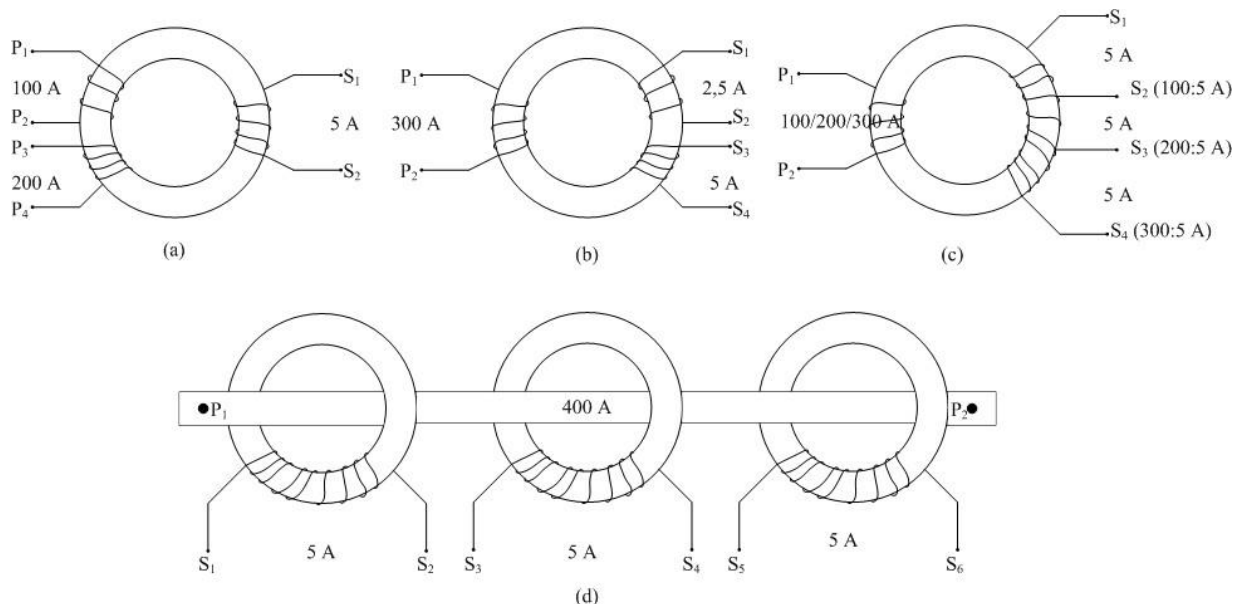
De acordo com o padrão ANSI, os valores de RTC podem ser de 10:5, 15:5, 25:5, 40:5, 50:5, 75:5, 100:5, 200:5, 300:5, 400:5, 600:5, 800:5, 1200:5, 1500:5, 2000:5, 3000:5, 4000:5, 5000:5, 6000:5, 8000:5 e 12000:5 A (IEEE Std C57.13-1993). Pela ABNT, os valores de RTC podem ser de 5:5, 10:5, 15:5, 20:5, 25:5, 30:5, 40:5, 50:5, 60:5, 75:5, 100:5, 125:5, 150:5, 200:5, 250:5, 300:5, 400:5, 500:5, 600:5, 800:5, 1000:5, 1200:5, 1500:5, 2000:5, 3000:5, 4000:5, 5000:5, 6000:5 e 8000:5 A (KINDERMANN, 2005).

Além disso, alguns transformadores de corrente possuem múltiplas RTCs, sendo os mesmos extensamente utilizados, pertencendo aos seguintes tipos (FILHO; MAMEDE, 2011):

- Com vários enrolamentos primários, os quais são montados isoladamente sobre um único núcleo, de acordo com a Figura 1 (a), que mostra um TC com relações 100/200:5 A;
- Com vários enrolamentos secundários, em que são constituídos por núcleo único, envolvido pelo enrolamento primário e vários enrolamentos secundários, conforme a Figura 1 (b), correspondente a um TC de relação 300:2,5/5A;
- Com derivação no secundário, onde um núcleo único é envolvido pelos enrolamentos primário e secundário, sendo este provido de uma ou mais derivações, segundo a Figura 1 (c), que apresenta um TC com relação 100/200/300:5; e
- Com vários núcleos secundários, os quais são constituídos de dois ou mais enrolamentos secundários, em que cada um desses enrolamentos possui núcleo próprio, de acordo com a Figura 1 (d), a qual apresenta um TC de relações 400:5/5/5A;

Destaca-se que apenas uma das relações de transformação pode ser utilizada em TCs com derivação no secundário, conectando-se as cargas entre os terminais S1 e o terminal secundário correspondente à respectiva RTC, de forma que os terminais secundários restantes fiquem em aberto. Um exemplo seria a utilização da RTC de 100:5 A no TC da Figura 1 (c), em que a carga deve ser conectada entre os terminais S1 e S2, mantendo-se os terminais S3 e S4 em aberto. Para utilização das outras RTCs, a conexão das cargas deve ocorrer de forma semelhante.

Figura 1. TC's com relações múltiplas. (a) TC com vários enrolamentos primários. (b) TC com vários enrolamentos secundários. (c) TC com derivação no secundário. (d) TC com vários núcleos secundários.

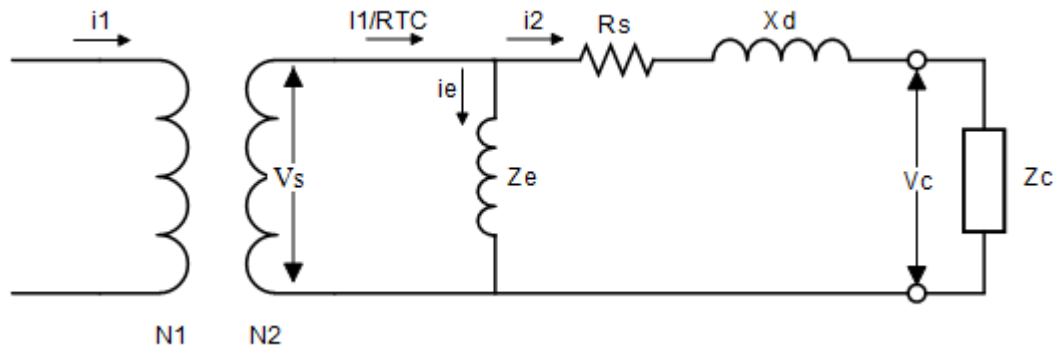


Fonte: SANTOS 2017.

2.2.2 Circuito Equivalente do Transformador de Corrente

Devido à ocorrência de transitórios influenciar no comportamento dos TCs, ambas as condições de regime permanente e transitório devem ser consideradas ao se observar as características de um TC. A Figura 2 apresenta o circuito equivalente de um TC conectado a uma carga, em que a impedância de dispersão primária e a parcela reativa do terminal secundário podem ser desconsideradas, visto que não afetam significativamente o seu desempenho (IEEE Std C37.110-2007).

Figura 2. Circuito equivalente do transformador de corrente.



Fonte: Adaptado de SANTOS 2011.

Na Figura 2, i_1 caracteriza a corrente primária, V_s a tensão secundária de excitação, i_e a corrente de excitação, i_1/RTC a corrente secundária total, Z_e a impedância do ramo de excitação, i_2 a corrente secundária que flui pela carga, R_s a resistência do enrolamento secundário, X_d a reatância de dispersão, V_c a tensão na carga e Z_c impedância da carga. N_1 e N_2 correspondem ao número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente. N_2/N_1 é a razão de espiras do TC (SANTOS, 2011).

A Equação 3 corresponde a corrente de excitação i_e , onde i_M equivale a corrente de magnetização e i_{Loss} as perdas no núcleo. Em condições normais de operação do TC (região linear da curva de magnetização do núcleo) o valor de i_e é muito pequeno e o erro produzido por essa corrente é desprezível. Contudo, quando ocorre um curto-circuito, a corrente primária é muito elevada e o TC pode entrar na região não linear da curva de excitação do núcleo, gerando erros consideráveis à transformação em razão do incremento desproporcional nos valores de i_e . Tal incremento gera distorções significativas na forma de onda da corrente secundária do TC. Admitem-se erros máximos de 2,5% e 10% para TCs de proteção. Mas, o valor mais utilizado em proteção é o de 10% (IEEE Std C37.110-2007).

$$i_e = i_M + i_{Loss} \quad (3)$$

A corrente secundária total é fornecida por (4).

$$i_1/RTC = i_2 + i_e \quad (4)$$

Dessa forma, a corrente primária total é fornecida por (5).

$$i_1 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \cdot (i_2 + i_e) \quad (5)$$

2.2.3 Fator de Sobrecorrente (F.S.)

O fator de sobrecorrente (F.S.) do TC é definido como a relação entre a máxima corrente de curto-circuito eficaz que pode passar pelo primário e a corrente primária nominal para que o erro de sua classe seja mantido. Através da Equação 6, obtêm-se o F.S. (SANTOS, 2017).

$$F.S. = \frac{I_1^{máx\ cc}}{I_{1\ nominal}} \quad (6)$$

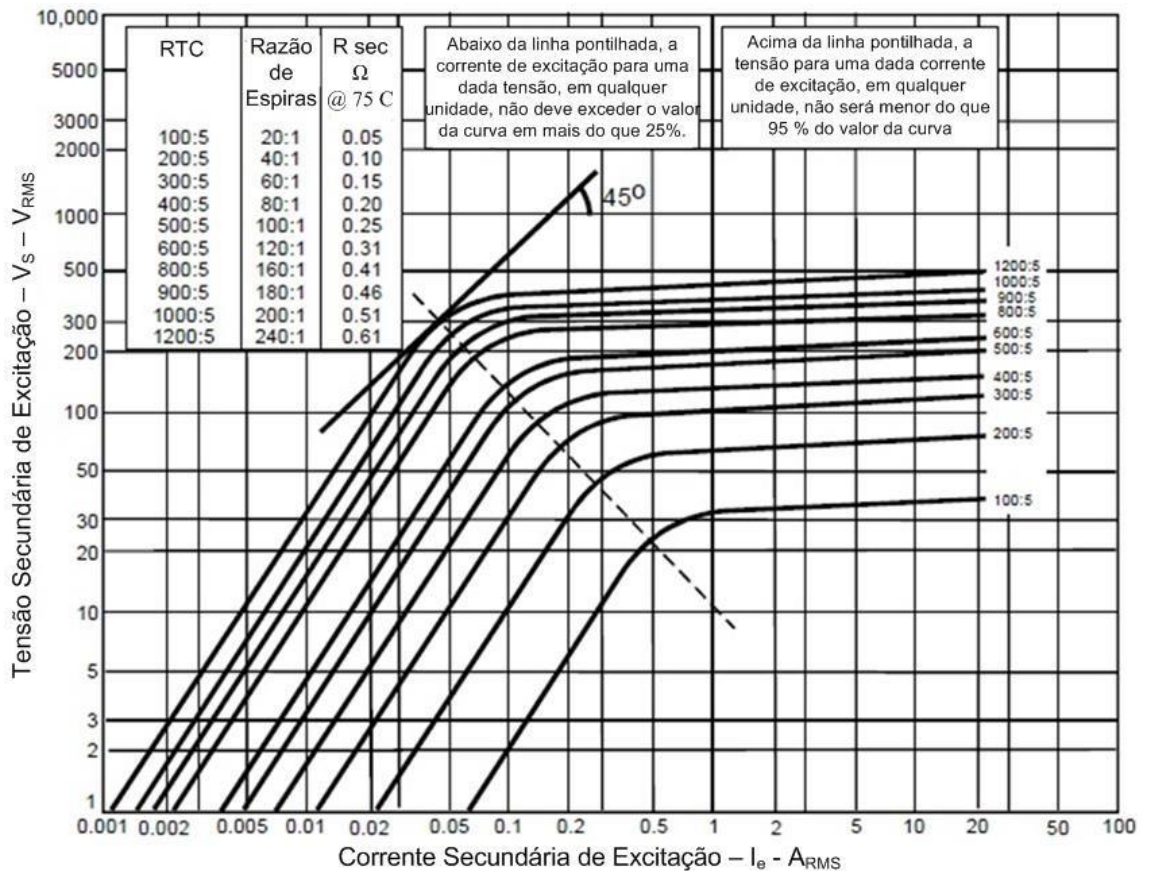
Os valores de F.S. são padronizados conforme com a norma vigente em cada país. O padrão ANSI estipula o valor do fator de sobrecorrente como 20. A ABNT estabelece como valores de F.S. 5, 10, 15 e 20.

Construtivamente, o F.S. produz uma limitação no erro produzido pela não linearidade da curva de magnetização do núcleo do TC. Para valores eficazes de corrente de curto-circuito menores ou iguais ao F.S. vezes a corrente nominal do TC, o erro da transformação não deve ultrapassar o valor máximo permitido (2,5% ou 10%) (SANTOS, 2017).

2.2.4 Característica de Excitação do TC

A operação do TC é ilustrada por curvas de excitação, em escala logarítmica, obtidas a partir de testes de campo e geradas por cálculos durante o processo de fabricação. Essas curvas apresentam a relação entre a tensão secundária de excitação (V_s) e a corrente de excitação do núcleo (i_e). A Figura 3 retrata um conjunto de curvas para um TC da classe C.

Figura 3. Curvas de excitação típicas para TC's classe C com várias relações de transformação.



Fonte: IEEE Std C37.110-2007.

Quando a tensão nos terminais da carga do TC é baixa, a corrente de excitação do núcleo também é baixa. Dessa forma, o erro causado por essa corrente não fornece grandes distorções à forma de onda do sinal da corrente secundária.

Contudo, o fluxo magnético no núcleo do TC aumenta em virtude do acréscimo da tensão nos terminais do secundário, provocado por um incremento de carga ou de corrente (nível de curto-circuito). Em algumas situações, o TC irá operar na região onde há um aumento desproporcional na corrente de excitação. Nessa região, o núcleo magnético encontra-se saturado e o TC apresenta elevada taxa de erro, gerando distorções significativas na forma de onda da corrente secundária.

2.2.5 Ponto de Joelho da Curva de Excitação (“knee-point”)

O ponto de máxima permeabilidade magnética do núcleo do transformador é representado pelo joelho da curva de excitação (IEEE Std C37.110-2007). Quando os valores de corrente e tensão são menores que às coordenadas desse ponto,

admite-se que o TC opera na região linear da característica de excitação apresentando erros de transformação desprezíveis. No entanto, considera-se que o TC atua na região de saturação para valores acima do joelho da curva, tornando maior a taxa de erro, o que gera distorções na forma de onda da corrente no terminal secundário, como mencionado na Seção 3.2.4.

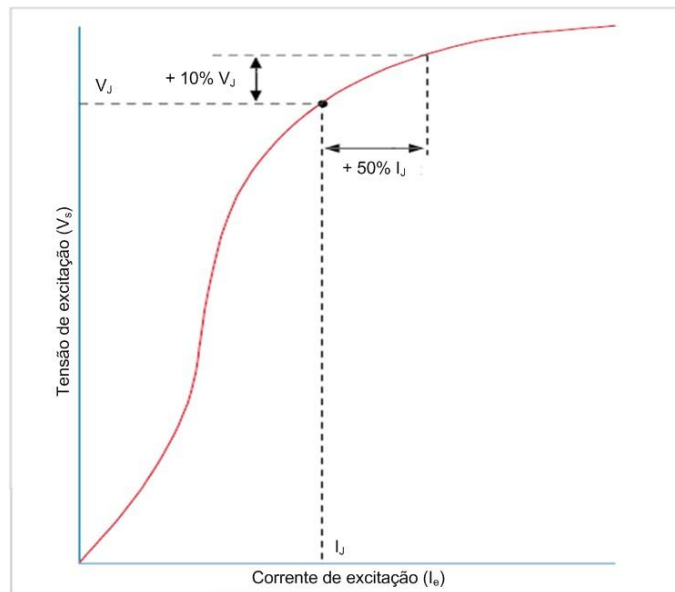
Apesar de apresentar um valor do ponto de joelho bem determinado, a curva de saturação não possui um ponto perceptível de saturação (ZOCHOLL, 2004). Segundo o IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers (IEEE Std C57.13-1993), quando o ponto onde a tangente da curva constitui em um ângulo de 45° com a abscissa, define-se o joelho da curva de excitação. No entanto, tal definição é válida para TCs com núcleos sem entreferro conforme a Figura 3. No caso dos núcleos com entreferro, esse ângulo deve ser de 30°.

Segundo a norma europeia, provinda de BS 3938-1973 e recomendada pela IEC, o ponto de joelho é definido como o ponto da curva de excitação em que um incremento de 10% na tensão de excitação gera um aumento de 50% na corrente de excitação. A inclinação da tangente nesse ponto pode ser definida pela Equação 7.

$$\frac{\Delta V_s}{\Delta I_e} = \frac{\log(1 + 0,1)}{\log(1 + 0,5)} = 0,235 \quad (7)$$

Em tal ponto, a tangente cresce uma década vertical para 4,25 décadas horizontais, formando um ângulo de aproximadamente 13° com a abscissa. Percebe-se ainda que nesse ponto a tensão é 20% a 25% maior do que a tensão de joelho obtida pela definição apresentada em IEEE C57.13-1993. A definição europeia para o ponto de joelho pode ser vista na Figura 4, onde V_j e I_j representam as coordenadas desse ponto.

Figura 4. Definição do ponto de joelho pela norma europeia.

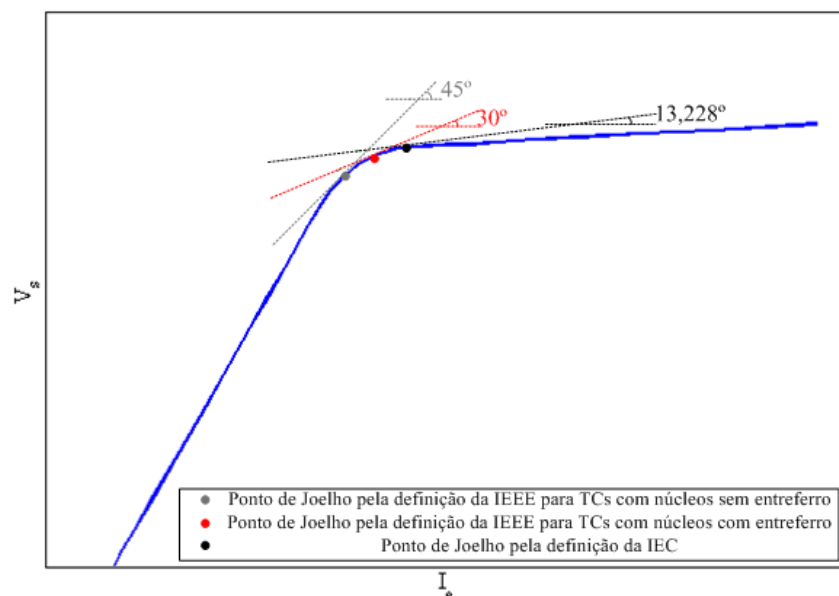


Fonte: Network Protection & Automation Guide.

As diferenças entre as tensões dos pontos de joelho de acordo com as definições da IEEE e da IEC são apresentadas na Figura 5.

Diversas definições para o ponto de joelho são utilizadas por alguns fabricantes. Um destes define o ponto como sendo o valor RMS da tensão de excitação que produz um pico de densidade de fluxo equivalente a 1,5 T. Enquanto outro fabricante classifica o valor da tensão que produz uma corrente de excitação igual à corrente secundária nominal (IEEE Std C37.110-2007).

Figura 5. Pontos de joelho pelas definições da IEEE e da IEC.



Fonte: SANTOS 2017.

2.2.6 Classificação dos Transformadores de Corrente quanto a Exatidão

2.2.7 Padrão ABNT

De acordo com a ABNT, a classe de exatidão de um TC é definida com base na medição do erro para uma corrente igual a nominal multiplicada pelo fator-limite de exatidão (F.S.), com uma carga nominal conectada ao secundário do TC (ABNT NBR 6856:2015).

Segundo Kindermann (2005), a ABNT determina a classe de exatidão de um TC baseado na máxima potência aparente (VA) consumida pela carga para uma corrente nominal de 5 A. Isto é, a máxima carga a ser conectada ao secundário do TC, em regime permanente, sem o erro exceder o valor da sua classe para um curto-circuito máximo limitado pelo fator de sobrecorrente.

Em (8), é representada a nomenclatura para TCs segundo o padrão nacional.

$$\left. \begin{matrix} \{A\} \\ \{B\} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} \{2,5\} \\ \{10\} \end{matrix} \right\} F \left. \begin{matrix} \{5\} \\ \{10\} \\ \{15\} \\ \{20\} \end{matrix} \right\} C \left. \begin{matrix} \{12,5\} \\ \{25\} \\ \{50\} \\ \{100\} \\ \{200\} \\ \{400\} \\ \{800\} \end{matrix} \right\} \quad (8)$$

O primeiro termo de (8) corresponde a reatância do TC, se é alta (A) ou baixa (B). O segundo caracteriza o erro admissível da sua classe de exatidão em porcentagem. O fator de sobrecorrente é indicado por “F” e seu valor é indicado pelo termo seguinte. A carga no secundário é representada por “C” e o valor a seguir refere-se ao valor em VA da potência aparente no secundário para uma corrente nominal de 5 A.

2.2.8 Padrão ANSI

De acordo com a IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers (IEEE Std C57.13-1993), a classe de exatidão é determinada por uma letra e a tensão secundária que descreve a performance do TC em regime permanente (classe de tensão). Esse valor é correspondente à tensão entregue a uma carga

padrão, conectada ao secundário do TC, para uma corrente equivalente a 20 vezes a corrente nominal, sem exceder 10% de erro na transformação.

A expressão (9) fornece a nomenclatura segundo o padrão ANSI.

$$\left. \begin{matrix} (C) \\ (K) \\ (T) \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 10 \\ 20 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 400 \\ 800 \end{matrix} \right\} \quad (9)$$

Assim:

- C – Corresponde ao fluxo de dispersão, o qual é desprezível e a característica de excitação pode ser usada diretamente para determinar o desempenho do TC (podendo ser calculado o erro). Admite-se que as correntes de carga e excitação estão em fase e que o enrolamento secundário está distribuído uniformemente (IEEE C37.110-2007).
- K – Igual à classe C, mas a tensão no joelho da curva de excitação precisa ser no mínimo 70% do valor nominal da tensão secundária especificada na nomenclatura. Transformadores dessa classe possuem núcleos maiores do que os da classe C.
- T – Indica que o erro deve ser obtido por meio de testes. O enrolamento primário é enrolado. Essa classe apresenta significativo fluxo de dispersão no núcleo, contribuindo para um erro considerável.

A antiga classificação segundo o padrão ANSI era determinada pelo valor de erro, seguido pela reatância do TC indicada por uma letra e um valor correspondente a classe de tensão secundária. Em (10) pode-se observar tais características, sendo o L a representação de um TC com baixa reatância e H, um de alta. Tal nomenclatura é aplicada apenas para TCs antigos, sendo a maioria fabricada antes de 1954 (SANTOS, 2017, p. 94).

$$\left. \begin{matrix} \{2,5\} \\ \{10\} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} \{L\} \\ \{H\} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 10 \\ 20 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 400 \\ 800 \end{matrix} \right\} \quad (10)$$

2.2.9 Cargas Padrão para TCs

De acordo com o IEEE Std C57.13-1993, a padronização das cargas dos TCs é feita conforme a Tabela 1. Nesta, verifica-se que as cargas com módulo de impedância entre 0,1 e 1,8 Ω destinam-se à TCs com função de medição, enquanto as cargas de 1 a 8 Ω representam *burdens* para TCs utilizados em esquemas de proteção.

A Tabela 2 representa as associações entre carga e tensão no terminal secundário do TC, para uma corrente de 20 vezes a corrente nominal. Ressalta-se que o valor dessa tensão, em módulo, é igual ao valor da carga multiplicado por 100.

Tabela 1– Cargas para TCs com enrolamentos secundários de 5 A

Carga	Designação da Carga	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Impedância (Ω)	VA (para 5A)	Fator de Potência
TC's para medição	B – 0.1	0,09	0,116	0,1	2,5	0,9
	B – 0.2	0,18	1,232	0,2	5	0,9
	B – 0.5	0,45	0,58	0,5	12,5	0,9
	B – 0.9	0,81	1,04	0,9	22,5	0,9
	B – 1.8	1,62	2,08	1,8	45	0,9
TC's para proteção	B – 1	0,5	2,3	1,0	25	0,5
	B – 2	1	4,6	2,0	50	0,5
	B – 4	2	9,2	4,0	100	0,5
	B – 8	4	18,4	8,0	200	0,5

Fonte: IEEE Std C57.13-1993.

Tabela 2– Associação entre cargas e TCs de acordo com a classe de tensão

Tensão no terminal secundário (em volts, para uma corrente 20 vezes a nominal)	Carga padrão
10	B – 0.1
20	B – 0.2
50	B – 0.5
100	B – 1
200	B – 2
400	B – 4
800	B – 8

Fonte: IEEE Std C57.13-1993.

2.2.10 Tipos Construtivos

Com relação a seus aspectos construtivos, os Transformadores de Corrente podem ser classificados conforme o modelo de enrolamento primário e o formato do núcleo (IEEE Std C57.13-1993 e IEEE Std C37.110-2007). Sendo os principais modelos construtivos de TC do tipo enrolado, bucha e do tipo janela.

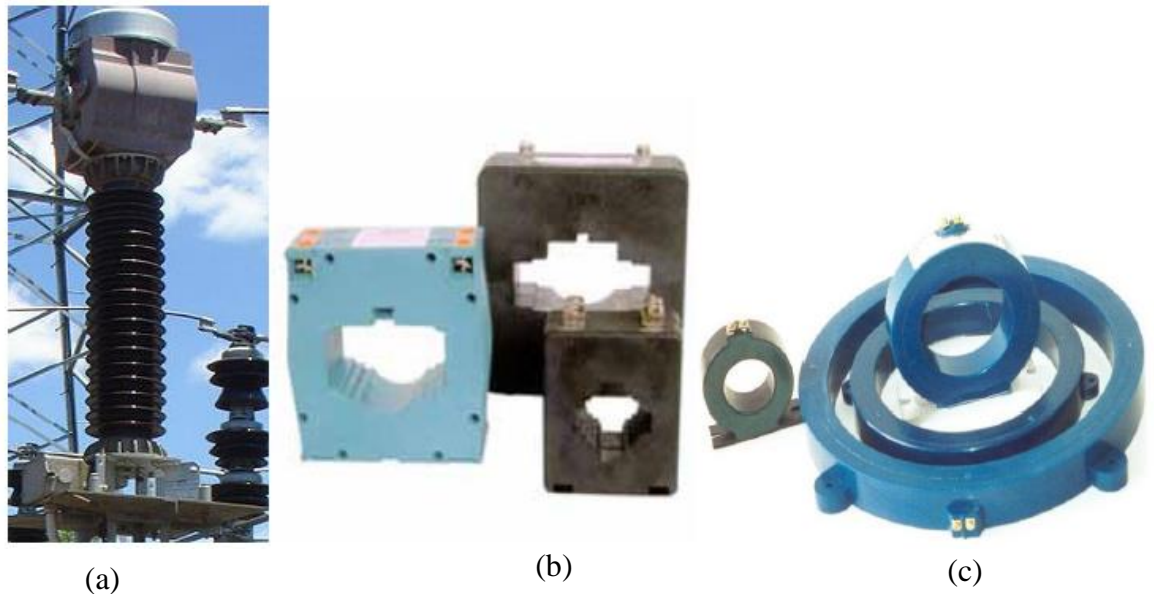
TCs do tipo enrolado possuem o enrolamento primário formado por uma ou mais espiras que envolvem mecanicamente o núcleo. Ambos os enrolamentos (primário e secundário), são isolados entre si e do núcleo em uma única estrutura.

Os do tipo bucha possuem o núcleo toroidal com enrolamento secundário acoplado ao núcleo e isolado do mesmo. Utiliza um condutor totalmente isolado que passa no interior do núcleo como enrolamento primário.

Já os TCs do tipo janela são semelhantes ao do tipo bucha, possuem enrolamento secundário isolado e acoplado permanentemente ao núcleo, porém, não possuem enrolamento primário como parte da estrutura. Utiliza-se um condutor que passa pelo interior do núcleo como enrolamento primário. Entre o condutor do primário e a estrutura do transformador, o ar é o meio isolante.

Os principais modelos de TCs utilizados para proteção de SEP são representados na Figura 6. No IEEE Std C57.13-1993 e IEEE Std C37.110-2007, encontram-se mais detalhes (SANTOS, 2011).

Figura 6. Tipos Construtivos de TCs para proteção. (a) Tipo enrolado. (b) Tipo bucha. (c) Tipo janela.



Fonte: SANTOS 2011.

2.3. Especificação de TCs para Relação de Transformação

Ao especificar a relação de transformação dos transformadores de corrente, necessariamente, dois critérios devem ser avaliados. Um deles analisa a corrente de carga no alimentador. Enquanto o outro considera o fator de sobrecorrente. Ambos os critérios usam os valores de corrente simétrica eficaz para os cálculos.

Para assegurar que o TC opere de forma correta, os dois critérios precisam ser analisados da mesma maneira para as correntes de carga e as de curto-circuito, de forma que o erro máximo não seja ultrapassado (IEEE Std C37.110-2007).

2.3.1. Critério da Corrente Nominal de Carga do Alimentador

A relação de transformação do TC deve ser maior do que a corrente nominal do alimentador, de acordo com a Equação 11. Como o critério do curto-circuito deve ser igualmente atendido, a seleção da RTC por esse critério não é definitiva.

$$I_{1TC} > I_{Nom. \text{ do alimentador}} \quad (11)$$

2.3.2. Critério do Curto-Circuito

Como mencionado anteriormente, além de atender a expressão (11), a relação de transformação do transformador de corrente deve satisfazer a condição

imposta pelo fator de sobrecorrente. Dessa forma, a corrente primária nominal do TC deverá ser maior ou igual à máxima corrente simétrica de curto-circuito em razão do fator de sobrecorrente (F.S.), conforme (12).

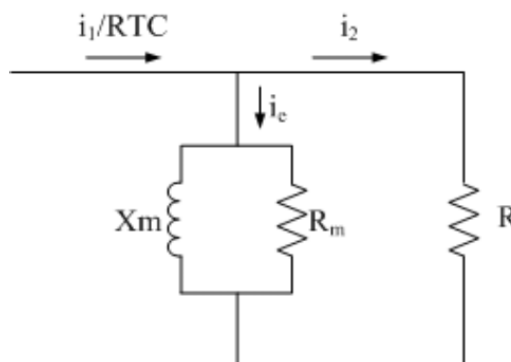
$$I_{1TC} \geq \frac{I_{CC\text{ máx}}}{FS} \quad (12)$$

2.4. Saturação de TCs

A representação do circuito simplificado de um TC é feita através da Figura 7, onde i_1/RTC é a corrente secundária total (corrente primária dividida pela relação de transformação), i_e é a corrente de excitação do núcleo e i_2 é a corrente disponível no terminal secundário, que alimenta a carga R. O valor de i_2 é dado por (13). X_m , R_m e Z_m representam, respectivamente, a reatância, a resistência e a impedância do ramo de magnetização.

$$i_2 = \frac{i_1}{RTC} - i_e \quad (13)$$

Figura 7 . Circuito simplificado do transformador de corrente.



Fonte: Adaptado de SANTOS 2011.

Há sempre a corrente de excitação, entretanto seu valor é muito pequeno em condições normais, uma vez que a impedância do ramo de magnetização é grande. Dessa forma, o erro causado devido a i_e é muito pequeno. Porém, quando ocorre a saturação magnética do núcleo, o valor de Z_m cai drasticamente e a maior parte da

corrente i_1/RTC passa pelo ramo de magnetização, causando distorção na forma de onda do sinal recebido pela carga do TC. A Figura 8 representa as formas de onda de um sinal de corrente ideal e de um sinal distorcido pela saturação (SANTOS, 2017).

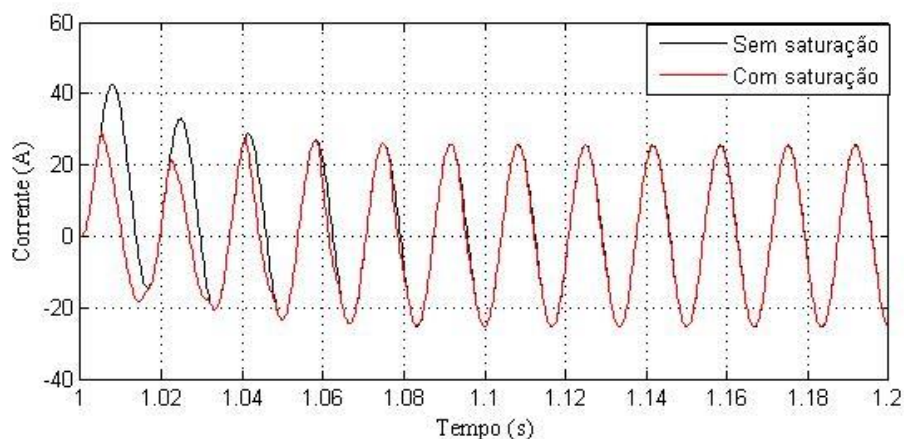
Quando ocorre a saturação do TC, a impedância vista por relés de distância $Z = V/I$ pode ser maior do que o valor esperado, causando problema de subbalcance neste tipo de proteção (MOONEY, 2008).

Quanto aos relés de sobrecorrente, a saturação do TC pode gerar ao equipamento uma corrente inferior a real, resultando na não operação ou atraso no tempo de operação dos mesmos (KOJOVIC, 2002 e EL-AMIN; ABBAS,2006).

Ainda, relés diferenciais podem operar indevidamente para uma falta externa (REBIZANT et al.,2004).

Entre as causas da saturação dos TCs preponderam-se as componentes unidirecionais das correntes de curto-circuito, o fluxo magnético remanescente no núcleo e a carga do TC (IEEE Std C57.13-1993 e IEEE Std C37.110-2007). Uma solução seria o dimensionamento do TC com um núcleo maior, entretanto, isso aumentaria o seu custo.

Figura 8. Formas de onda da corrente secundária para TC saturado e não-saturado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.1. Características Dinâmicas

2.4.1.1. Variação do Fluxo com Corrente Primária Assimétrica

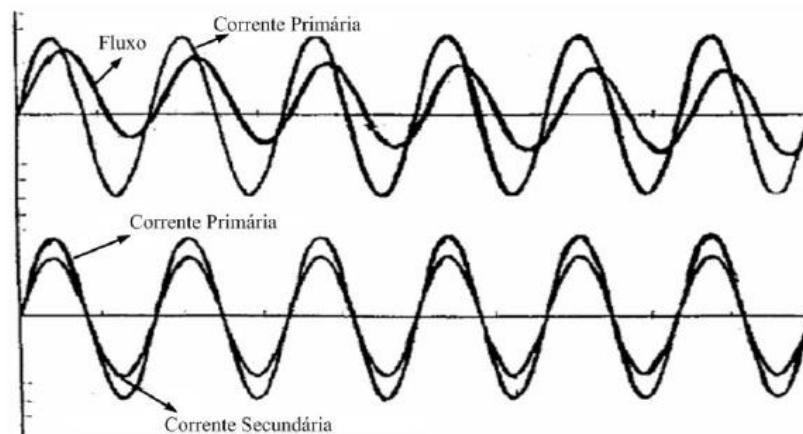
A componente unidirecional de uma corrente de curto-circuito gera um aumento significativo ao fluxo magnético presente no núcleo do TC. Ao atingir a

assimetria máxima, o fluxo no núcleo do transformador pode aumentar para $1 + X/R$ vezes o fluxo derivado de um sinal senoidal (ausente a componente unidirecional), uma vez que X e R representam a reatância e a resistência primária do sistema até o ponto da falta (IEEE Std C37.110-2007).

O comportamento do fluxo para uma corrente simétrica e assimétrica é demonstrado nas Figuras 9 e 10. Esta representa o fluxo resultante e a corrente secundária durante a completa assimetria da corrente primária, enquanto aquela apresenta o fluxo para uma corrente primária sem assimetria.

Quando não há assimetria, o núcleo do TC não entra na região saturada, o que não gera distorções na forma de onda da corrente secundária.

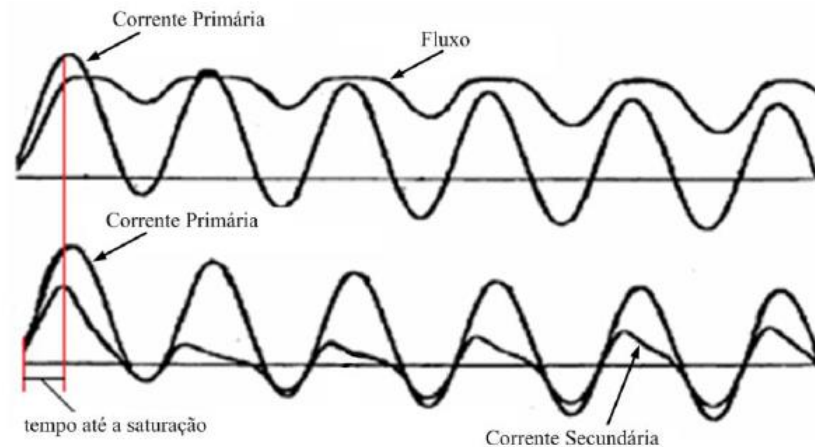
Figura 9. TC não saturado: Relação entre corrente primária e fluxo.



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

No momento em que a corrente primária é completamente assimétrica, o aumento do fluxo não ocorre de forma instantânea, indicando que a saturação não ocorre instantaneamente. Assim, o intervalo até a saturação é denominado de *time-to-saturation* (tempo até a saturação).

Figura 10. TC não saturado: Relação entre corrente primária e fluxo.



Fonte: Adaptado de IEEE Std C37.110-2007

2.4.1.2. Causas da Saturação

Conhecer o tempo até a saturação é essencial para o projeto e aplicação de relés de proteção. Normalmente, um TC reproduz de forma precisa as correntes assimétricas por um ou dois ciclos antes de atingir a região de saturação. Conforme o guia da IEEE para aplicação de transformadores de corrente utilizados para proteção (IEEE Std C37.110-2007), os critérios que determinam o tempo até a saturação do TC são o grau de assimetria da corrente de falta, a magnitude da mesma, o fluxo remanescente no núcleo do TC, a impedância do circuito secundário, a tensão de saturação e a razão de espiras.

A razão X/R do sistema, bem como o ângulo de incidência de falta determinam o grau de assimetria da forma de onda da corrente primária. Quanto maior o grau de assimetria, mais rápido será a saturação do TC.

O mesmo ocorre com a magnitude da corrente de falta, ou seja, quanto maior a intensidade da corrente, mais rápido ocorre o incremento de fluxo até o ponto de saturação, pois a magnitude da corrente assimétrica é proporcional à magnitude da sua componente senoidal.

Quanto ao fluxo remanescente, o mesmo irá se somar ou subtrair ao fluxo gerado pelas correntes do primário de acordo com a polaridade desse fluxo gerado. Se a presença do fluxo remanescente resultar em um incremento no fluxo total do núcleo, o tempo até a saturação será menor. Caso contrário, em certos casos, devido ao alto fluxo residual, a saturação do TC pode ocorrer logo após o início da falta.

Um TC com uma elevada carga secundária satura de forma mais rápida, pois requer maior tensão para um dado valor de corrente e o fluxo é proporcional a tensão. Quando há impedâncias com magnitudes iguais e fator de potência diferente, a que possuir maior parcela indutiva, ou seja, possuir o menor fator de potência irá gerar uma saturação de forma mais lenta, tendo em vista que o tempo até a saturação é maior para cargas puramente resistivas ou com menores parcelas indutivas. Isso ocorre devido à indutância representar uma baixa impedância para componentes contínuas das correntes assimétricas, o que reduz a tensão na carga e o fluxo associado.

Devido a impedância secundária de excitação do TC depender da quantidade de ferro no núcleo, a área da seção transversal do mesmo é proporcional ao fluxo requerido para a saturação. Tal fato aumenta o valor da tensão de saturação, ocorrendo o mesmo com o tempo até a saturação.

Por fim, segundo o (IEEE Std C37.110-2007), para uma determinada área de núcleo e valor de corrente primária, o fluxo diminui a medida que se aumenta a razão de espiras do TC, o que reduz a densidade de fluxo.

2.4.2. Efeitos do Fluxo Remanescente

O fluxo remanescente no núcleo do TC está relacionado ao valor de fluxo imediatamente antes da interrupção da corrente primária, sendo determinado de acordo com o valor da corrente primária simétrica, da componente unidirecional e da impedância do circuito secundário. A ocorrência do máximo fluxo remanescente se dá ao interromper a corrente primária durante a saturação do transformador (IEEE Std C37.110-2007).

Como mencionado na seção anterior, de acordo com a polaridade do fluxo, o mesmo pode fazer com que o TC sature de forma mais rápida na ocorrência de eventos como curtos-circuitos.

Após se estabelecer no núcleo do TC, o fluxo remanescente se dissipa aos poucos. A fim de reduzir o fluxo remanescente em menos de 10% da densidade de fluxo de saturação, uma tensão referente a 60% da tensão do ponto de joelho deve ser aplicada. Enquanto o núcleo não for desmagnetizado, o fluxo permanecerá no mesmo.

Algumas formas para controlar a presença do fluxo remanescente são aplicadas, como o uso de diferentes quantias de aço no núcleo do TC, núcleos com

entreferro, bem como, a utilização de núcleos com duas magnetizações (SANTOS, 2017, p. 101).

2.4.3. Efeitos da Saturação Sobre os Principais Tipos de Proteção

2.4.3.1. Efeitos da Saturação em Relés de Sobrecorrente

Segundo EL-AMIN E AL-ABBAS (2006), TCs saturados podem fornecer corrente suficiente para a operação de relés de sobrecorrente instantâneos, sem afetar o desempenho dos mesmos. Contudo, podem ocorrer atrasos relevantes na operação de relés temporizados devido à saturação do TC, dependendo da severidade da mesma. Ressalta-se que a intensidade da saturação está associada com o nível da corrente de curto-circuito, a constante X/R do sistema, a carga do transformador e ao fluxo remanescente do núcleo.

Contudo, sempre que os relés de sobrecorrente forem ajustados corretamente, os atrasos desses dispositivos não provocarão falhas quanto à coordenação dos esquemas de proteção.

2.4.3.2. Efeitos da Saturação em Relés de Distância

Segundo MOONEY (2008), a saturação do TC gera uma redução na magnitude de corrente e defasagem desta, implicando em um aumento significativo na impedância vista por relés de distância. Isso provoca problemas de subalcance e, conseqüentemente, atrasos na operação desses relés.

2.4.3.3. Efeitos da Saturação em Relés Diferenciais

Apesar de relés diferenciais serem considerados confiáveis e robustos, em certas situações, esses equipamentos são induzidos a operar indevidamente. Parâmetros de alta sensibilidade e seletividade podem não considerar a possibilidade da saturação do TC para faltas externas, promovendo a operação do relé de forma incorreta (REBIZANT et al., 2004).

Para faltas externas, a saturação do transformador produz correntes diferenciais fictícias, as quais podem ser maiores que os valores de ajuste para operação do relé diferencial ou para a operação de um relé de sobrecorrente que utilize a conexão diferencial. Nessas condições, ambos os relés podem considerar a falta externa como interna e atuar indevidamente (DASHTI et al., 2007).

2.5. Considerações Finais

Neste Capítulo, foram abordados os principais conceitos dos TCs, envolvendo as causas e os efeitos da saturação nos dispositivos de proteção. Tal introdução teórica foi efetuada com a finalidade de apresentar a base dos conceitos sobre o fenômeno da saturação, bem como abordar as demais características que compreendem os TCs.

Devido à saturação dos TCs provocar a atuação indevida ou até mesmo a não atuação dos relés de proteção, os efeitos da mesma sobre os principais tipos de proteção foram retratados.

No próximo Capítulo, algumas metodologias aplicadas para a detecção dos intervalos distorcidos da forma de onda de corrente secundária são apresentadas.

3. MÉTODOS ANALISADOS PARA DETECÇÃO DA SATURAÇÃO EM TCs

3.1. Considerações Gerais

Os dispositivos de proteção podem operar indevidamente ou até não atuarem devido à saturação dos TCs, a qual deforma os sinais de corrente enviados aos relés de proteção.

Desta forma, diversos métodos para detecção já foram propostos utilizando inúmeros procedimentos matemáticos e computacionais, a fim de garantir o funcionamento adequado dos esquemas de proteção na ocorrência da saturação dos transformadores de corrente. Ressalta-se que para realizar uma detecção adequada da saturação é indispensável obter o intervalo em que o evento ocorre.

Dois dos métodos aplicados para detecção da saturação de TCs, Morfologia Matemática e Terceira Derivada, são descritos no decorrer deste Capítulo, bem como, uma técnica nova proposta para este fim.

3.2. Método de Detecção Utilizando Morfologia Matemática

Apresentada por LU et. al (2008), a metodologia consiste na detecção da saturação dos TCs por meio da Morfologia Matemática. Tal técnica baseia-se em operadores morfológicos, sendo a erosão e a dilatação seus operadores fundamentais.

Para obter os mesmos, uma janela móvel de dados, com um número ímpar de amostras, é analisada em função de seu termo central. As amostras precisam ser separadas em dois conjuntos de dados: amostras pares $x_e[n]$ e ímpares $x_o[n]$. Para uma janela de dados com cinco amostras, por exemplo, $x[n] = [x_0, x_1, x_2, x_3, x_4]$, os valores de x com índice zero ou valor par são associados à $x_e[n]$ ($x_e[n] = [x_0, x_2, x_4]$). Já os valores de x com índices ímpares são associados a $x_o[n]$ ($x_o[n] = [x_1, x_3]$). O termo central nessa janela de dados é representado por x_2 e o termo x_4 caracteriza o último termo atualizado da janela.

Como os sinais básicos de um sistema de potência são compostos por senóides, um Elemento Estruturante (SE ou *Structuring Element*) é capaz de reproduzir as características senoidais dos sinais de corrente secundária. Presumindo que as senóides são simétricas, o SE deve ser simétrico de acordo com (14).

$$k_m = [\cos(2m - 1)\varphi, \dots, \cos\varphi, \cos\varphi, \dots, \cos(2m - 1)\varphi] \quad (14)$$

Em (14), $\varphi = 2\pi ft$, onde f corresponde à frequência do sistema e t ao intervalo entre duas amostras consecutivas. O comprimento total de k_m é igual a $2m$, sendo m um inteiro positivo com valores distintos para diferentes SEs. Devido ao SE ser espelhado, a posição dos valores no conjunto é $v = 1, \dots, m$, tanto para a direita quanto para a esquerda, contados a partir do eixo de simetria do conjunto.

Conforme a SE projetada, os operadores Dilatação e Erosão são dados segundo (15) e (16), respectivamente.

$$(x \oplus k_m) = \max_{n-v \in Dx, v \in Dk_m} \left\{ \frac{x(n-v)}{k_m(v)} \right\} \quad (15)$$

$$(x \ominus k_m) = \min_{n+v \in Dx, v \in Dk_m} \left\{ \frac{x(n+v)}{k_m(v)} \right\} \quad (16)$$

Onde x é o sinal a ser processado, n corresponde à posição do termo central da janela de dados, $n-v$ representa a posição dos termos à esquerda do termo central e $n+v$, a posição dos termos à direita. Assim, na dilatação são utilizados os termos à esquerda do SE e no cálculo da erosão os termos da direita.

A partir da diferença entre o valor central da janela de dados e um valor estimado, obtém-se o detalhe do sinal conforme (17).

$$d[n] = x_o[n] - P(x_e[n]) \quad (17)$$

O operador morfológico para estimação é representado por P e $x_o[n]$ corresponde ao valor central da janela de dados. O operador morfológico para estimação é dado pela média dos resultados de dilatação e erosão utilizando diferentes SEs com diferentes comprimentos. Tal operador é definido de acordo com (18).

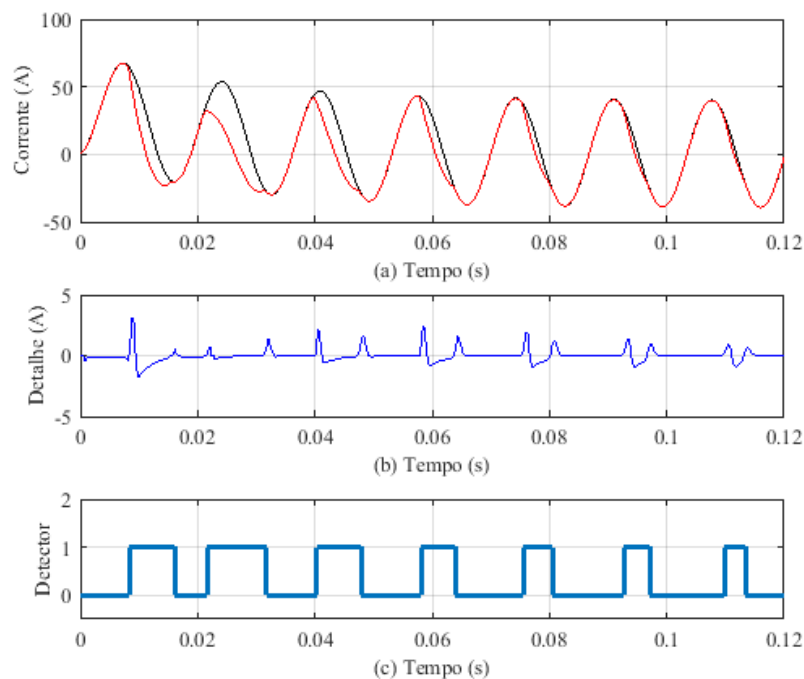
$$P(x_e) = \frac{1}{2D} \sum_{i=1}^D (x_e \oplus k_i + x_e \ominus k_i) \quad (18)$$

Em (18), k_i representa um SE com comprimento $2i$ ($i=1, \dots, D$), como definido em (14). Quando $i = D$, a quantidade de amostras pares usadas na estimação

corresponde a $2D$, onde D equivale ao número de elementos na vizinhança esquerda e direita do termo central da janela de dados.

Quando não há intervalos distorcidos pela saturação do TC, o detalhe do sinal possui valores próximos à zero. Contudo, nos instantes que delimitam os períodos de saturação, o sinal do detalhe demonstra incrementos expressivos, facilitando a detecção desses intervalos. A Figura 11 demonstra o desempenho da metodologia.

Figura 11. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como os autores da proposta não definem um valor de ajuste para detecção, o mesmo foi obtido empiricamente. A condição para detecção do início e fim de um intervalo de saturação utilizada neste Trabalho é descrita pela expressão (19).

$$|d[n]| > 0,13 \text{ A} \quad (19)$$

3.3. Método de Detecção por Meio da Terceira Derivada

De acordo com os autores (WISZNIEWSKI *et al.*, 2008), o tempo da saturação, ou seja, os instantes de início e fim dos intervalos distorcidos, pode ser determinado no momento em que a comparação entre a amostra atual e um valor

calculado, ultrapassar o valor admitido de erro para a estimação. Esta é realizada com base na terceira derivada do sinal amostrado, de acordo com (19).

$$i_{2e}(n) = 4.i_2(n - 1) - 6.i_2(n - 2) + 4.i_2(n - 3) - i_2(n - 4) \quad (19)$$

Onde n caracteriza a amostra a ser estimada, i_{2e} a corrente secundária estimada e i_2 a corrente secundária atual.

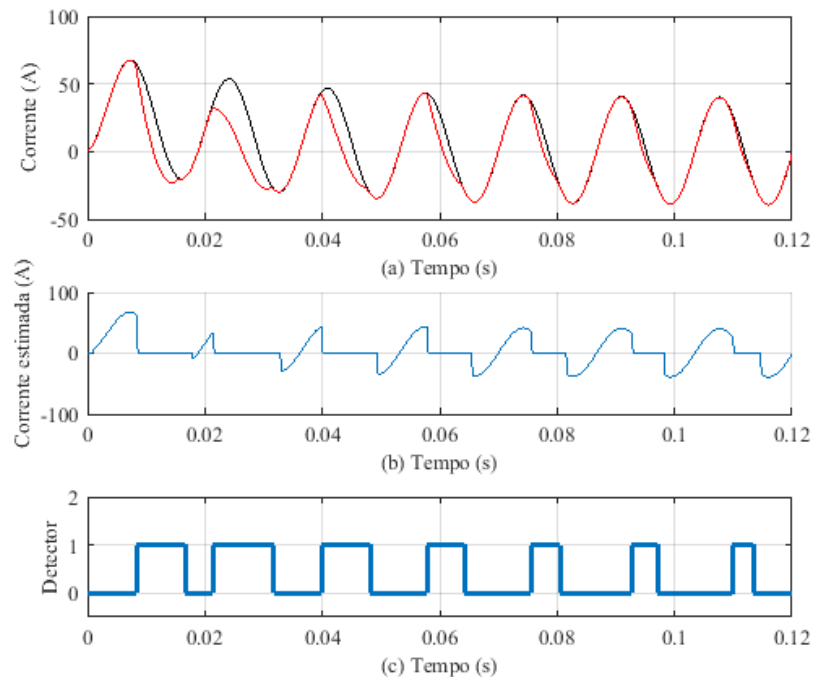
A identificação dos instantes correspondentes ao início e fim dos intervalos distorcidos ocorre quando a condição apresentada em (20) é satisfeita. Quando a diferença entre o valor absoluto da amostra estimada e o valor absoluto da amostra recebida torna-se maior do que o valor limítrofe, dado por $\Delta \cdot |i_{2e}(n)|$, fica caracterizado o início ou o fim de um intervalo de saturação. Ressalta-se que este valor limítrofe representa o erro máximo admitido para a estimação do valor futuro pela terceira derivada. Neste trabalho, foi considerado um valor limítrofe de 0,15 A, para uma amostragem de 64 amostras/ciclo.

$$|i_{2e}(n)| - |i_2(n)| > \Delta \cdot |i_{2e}(n)| \quad (20)$$

O valor do erro de estimação foi definido a fim de obter a detecção mais exata possível. Destaca-se que outras amostragens foram analisadas (32 e 96 amostras/ciclo), sendo ajustado um valor próprio de erro máximo para cada amostragem.

A Figura 12 representa o funcionamento da metodologia, onde, ao início do intervalo distorcido, o estado do detector é alterado de zero para um, permanecendo assim até que haja a determinação do fim do respectivo intervalo de saturação.

Figura 12. Detecção dos intervalos de saturação por Meio da Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4. Método de Detecção Proposto

A técnica de detecção proposta também se baseia nos operadores morfológicos como a erosão e a dilatação. Da mesma forma que a metodologia proposta por LU et al (2008), os operadores morfológicos foram obtidos através da análise do termo central de uma janela móvel de dados, sendo a mesma composta por cinco amostras, conforme as Equações 15 e 16. Além disso, o sinal de detalhe e o operador morfológico de estimação também seguem as definições originais expressas em (17) e (18).

Apesar de o método proposto possuir a base dos operadores fundamentada na morfologia matemática, a detecção dos intervalos distorcidos é realizada de forma diferente. Dessa forma, propõe-se que o valor limítrofe para a detecção da saturação seja dado pela Equação 21, o qual deve ser atualizado a cada nova amostra. Assim, quando o valor do sinal de detalhe se torna maior que o valor de $Th(a)$, fica determinado o início do intervalo de saturação. Após, durante o pico inicial do sinal de detalhe, considera-se o sinal como saturado, uma vez que a condição expressa em (21) seja satisfeita. Após esse pico, o sinal de detalhe assume valores menores do que os valores de $Th(a)$. Sendo assim, o sinal é considerado distorcido por saturação enquanto a condição (22) for satisfeita.

Quando (22) deixa de ser verdadeira, chega-se ao pico do sinal de detalhe que indica o final do intervalo de saturação. Logo, durante este pico, verifica-se a saturação enquanto a condição (23) for satisfeita.

$$d(a) > Th(a) \quad (21)$$

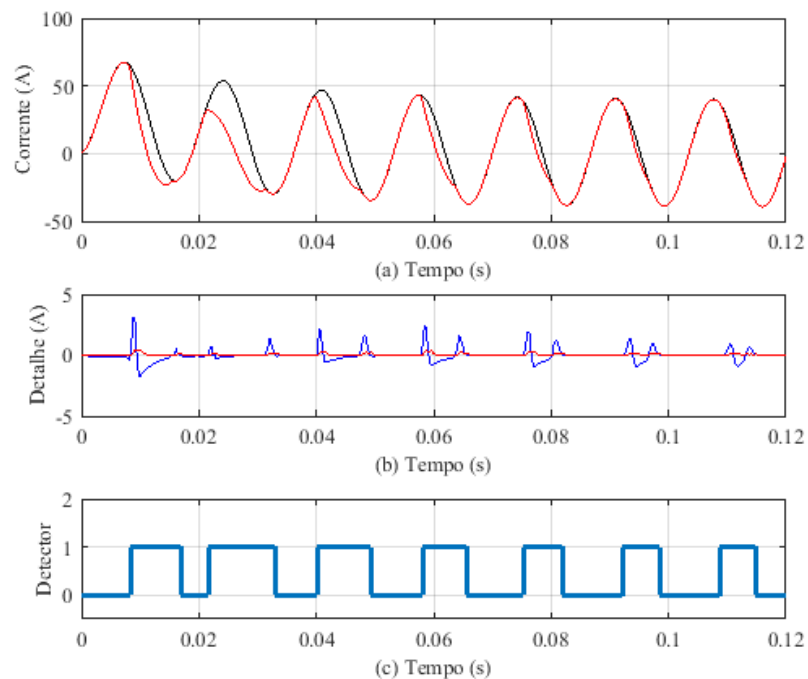
$$d(a) < Th(a) \quad (22)$$

$$d(a) > Th(a) \quad (23)$$

O valor de $Th(a)$ é dado conforme a Equação 24. Onde σ representa o desvio padrão da janela de dados considerada para valores de detalhe. Nas Equações 21 a 24, a representa a amostra atual processada. A Figura 13 exemplifica o funcionamento da técnica descrita.

$$Th(a) = \sigma \frac{(|d(a-4)|, |d(a-3)|, |d(a-2)|, |d(a-1)|)}{3} \quad (24)$$

Figura 13. Detecção dos intervalos de saturação pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5. Considerações Finais

No decorrer dos anos, diversas técnicas para realizar a detecção da saturação de transformadores de corrente foram recomendadas. Neste Capítulo, duas delas foram descritas, as quais foram implementadas para comparação com a técnica aqui proposta.

Os resultados alcançados para cada método são expostos no Capítulo seguinte. Para todos os casos analisados, os resultados das técnicas são referentes a uma taxa de amostragem correspondente a 64 amostras por ciclo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Considerações Gerais

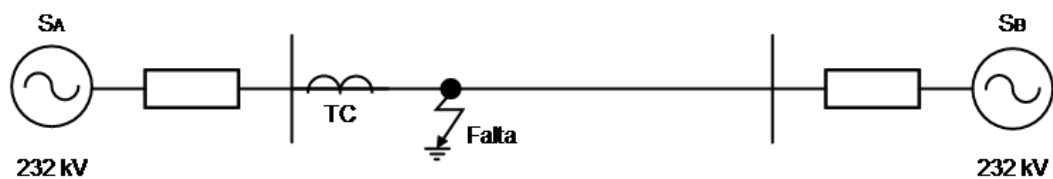
Neste Capítulo, os métodos abordados têm seus desempenhos comparados para o processamento de sinais provenientes de simulações computacionais de diferentes tipos de curtos-circuitos em uma linha de transmissão.

Para realizar as análises, um sistema teste foi utilizado, sendo descrito no decorrer do trabalho. Cada técnica aplicada foi analisada quanto a atuação para cada caso estudado.

4.2. Sistema Teste

Os sinais analisados foram obtidos por meio de um sistema teste simulado no software EMTP- ATP, conforme a Figura 14.

Figura 14. Sistema teste implementado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema teste acima representa uma linha de transmissão trifásica, com duas fontes equivalentes em seus terminais, defasadas por 30° , de modo que o fluxo de potência se dá da esquerda para a direita. Essas fontes possuem tensão de linha de 232 kV e impedâncias de sequência zero e sequência positiva iguais a $3,681+j24,515 \Omega$ e $0,819+j7,757 \Omega$, respectivamente. A linha apresenta comprimento total de 200 km e impedâncias de seqüências zero e positiva equivalentes a $0,1841+j1,2258 \Omega/\text{km}$ e $0,041+j0,3878 \Omega/\text{km}$, respectivamente. Além disso, os TCs simulados são do tipo C400, com relação de transformação de 2000:5, representados por transformadores ideais com indutores do tipo-96 conectados em paralelo a seus terminais secundários, representando a característica de histerese, conforme KEZUNOVIC et al. (1994).

Os métodos descritos no Capítulo anterior foram implementados no Matlab®, os quais processam as formas de onda obtidas a partir das simulações do sistema teste, sob diferentes condições e tipos de curto.

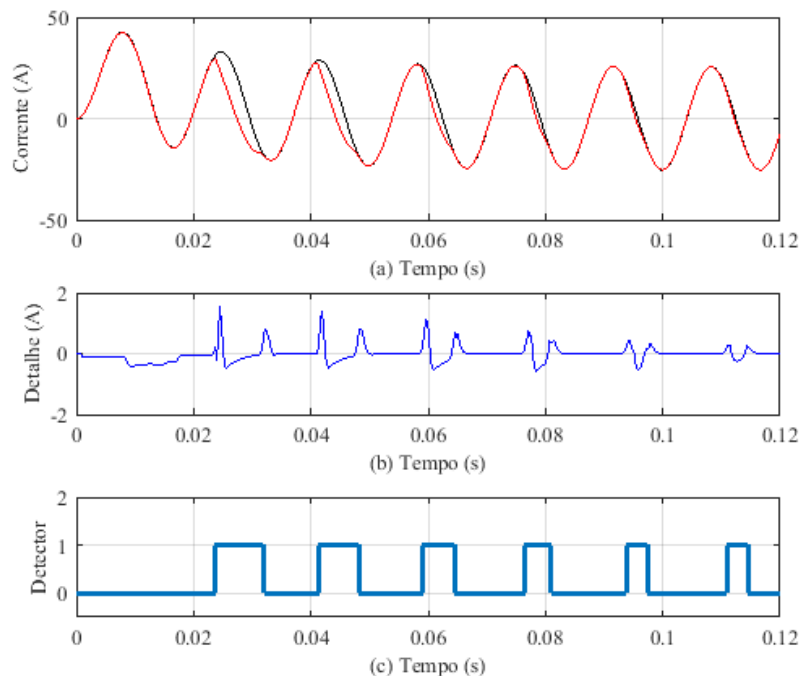
4.3. Casos Analisados

4.3.1. Caso 1: Falta Monofásica, 4 Ω de Carga, 4% LT e Fluxo Remanescente de 0%

Os resultados abaixo representam o funcionamento das metodologias para o caso analisado. É possível perceber os valores incrementados do detalhe do sinal nos instantes que indicam o início e fim dos intervalos de saturação ao realizar a detecção por meio da Morfologia Matemática e pelo Método Proposto. Quando a detecção é realizada pela Terceira Derivada, nota-se a diferença no valor da corrente estimada no período que caracteriza o início e fim da saturação.

A detecção por Morfologia Matemática, demonstrada na Figura 15, atuou adequadamente apenas no início do primeiro intervalo distorcido, o qual ocorreu durante o segundo ciclo. Nos demais, a mesma ocorreu de forma atrasada, variando entre uma e seis amostras. Já os instantes que caracterizam os fins dos intervalos de saturação, foram detectados de forma antecipada, alternando entre seis e três amostras.

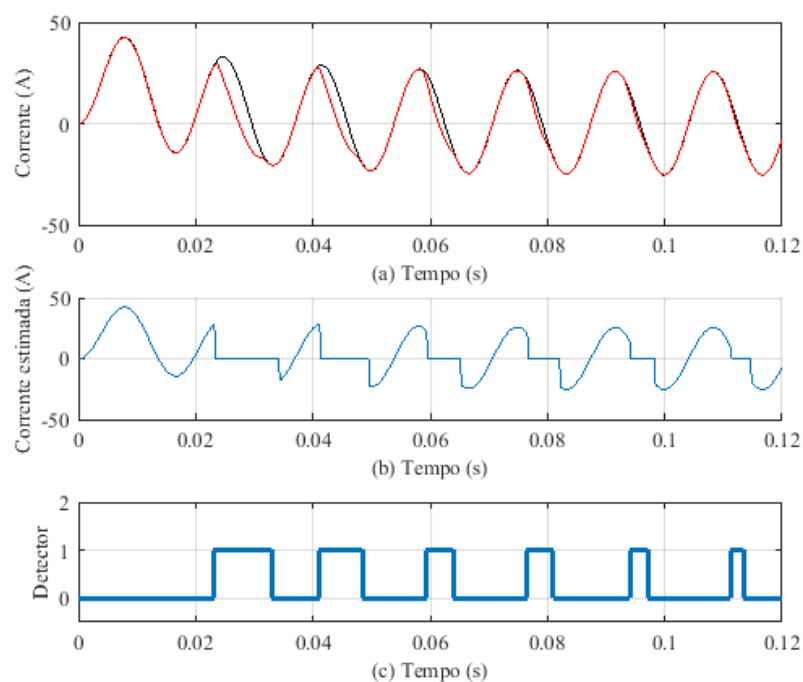
Figura 15. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O método da Terceira Derivada representado através da Figura 16 detectou o início dos intervalos saturados de maneira adiantada no primeiro ciclo, corretamente no segundo e com atraso entre duas e sete amostras nos demais intervalos. Já para os fins, apresentou o mesmo comportamento da metodologia anterior, porém com maior variação quanto ao número de amostras antecipadas, chegando a sete amostras.

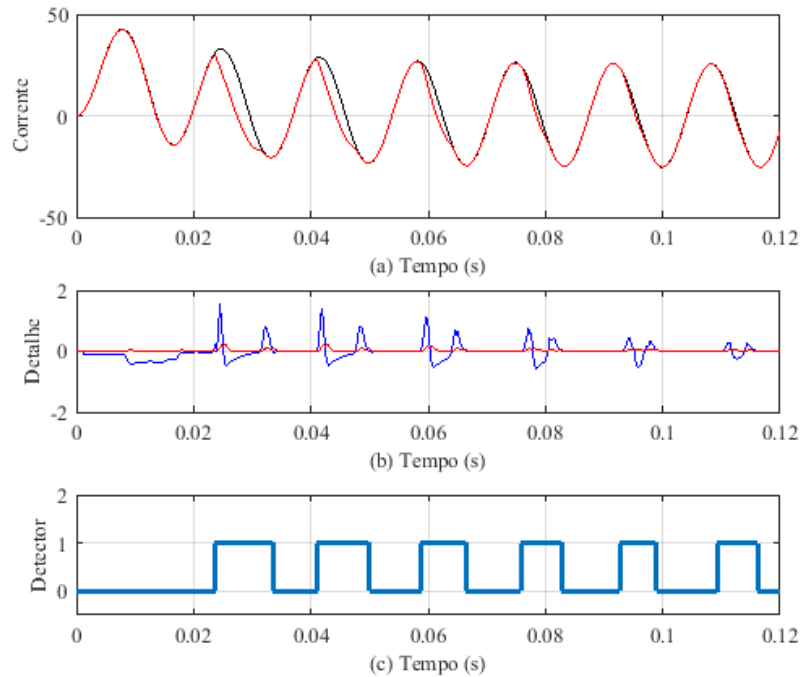
Figura 16. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já o Método Proposto, detectou adequadamente todos os períodos que caracterizam o início da saturação e o fim dos mesmos até o sexto ciclo. Entretanto, o último intervalo distorcido apresentou o atraso de uma amostra. A Figura 17 mostra a atuação da metodologia proposta.

Figura 17. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

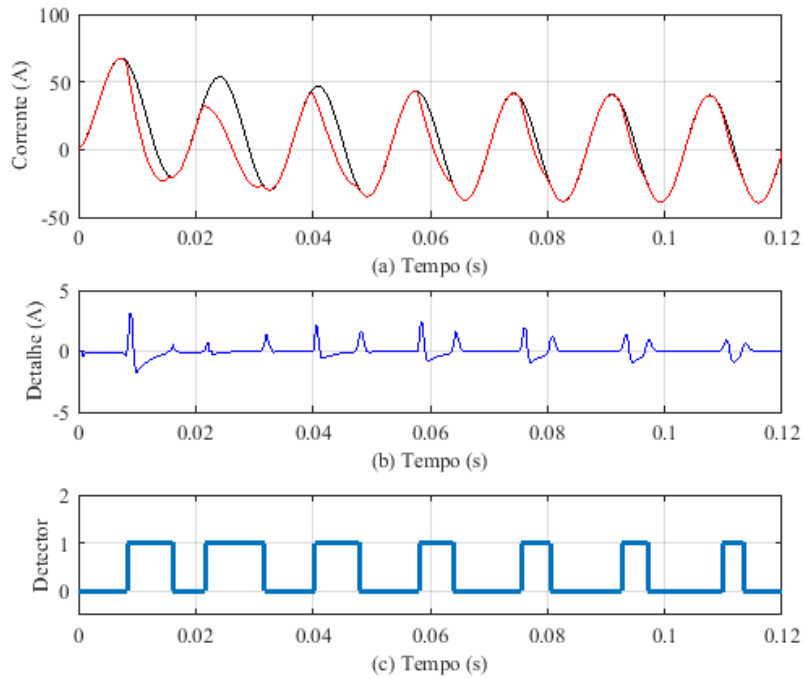
4.3.2. Caso 2: Falta Bifásica-Terra, 4Ω de Carga, 4% LT e Fluxo Remanescente de 0%

Neste caso, a detecção por Morfologia Matemática, mostrada na Figura 18, ocorreu de forma adequada quanto ao início dos intervalos saturados durante os quatro ciclos iniciais, apresentando um atraso nos três últimos. Entretanto, a detecção dos períodos que correspondem ao fim dos mesmos ocorreu de maneira antecipada em três amostras durante todos os intervalos distorcidos.

Na detecção por Terceira Derivada, os períodos de início dos intervalos foram localizados antecipadamente do segundo ao quarto ciclo e atrasados do quinto ao sétimo. Enquanto o fim dos intervalos foi detectado de forma adiantada entre cinco e três amostras em todos os ciclos.

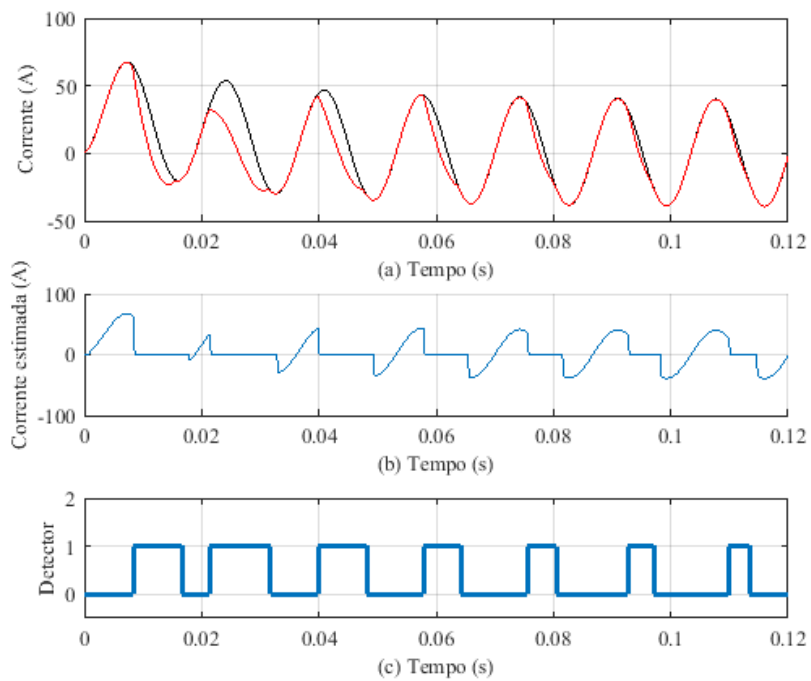
Quanto à Técnica de Detecção Proposta, cujos resultados estão expostos na Figura 20, os intervalos foram identificados corretamente quanto ao início em todos os ciclos, detectando de forma atrasada o fim da saturação no quarto e quinto ciclo em uma amostra.

Figura 18. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.



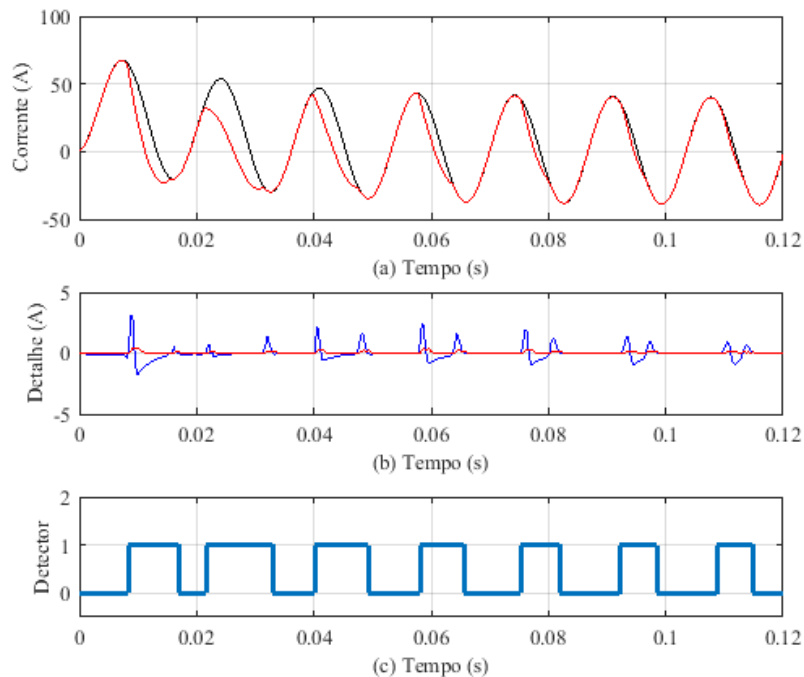
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3. Caso 3: Falta Trifásica, 4 Ω de Carga, 4% LT e Fluxo Remanescente de 0%

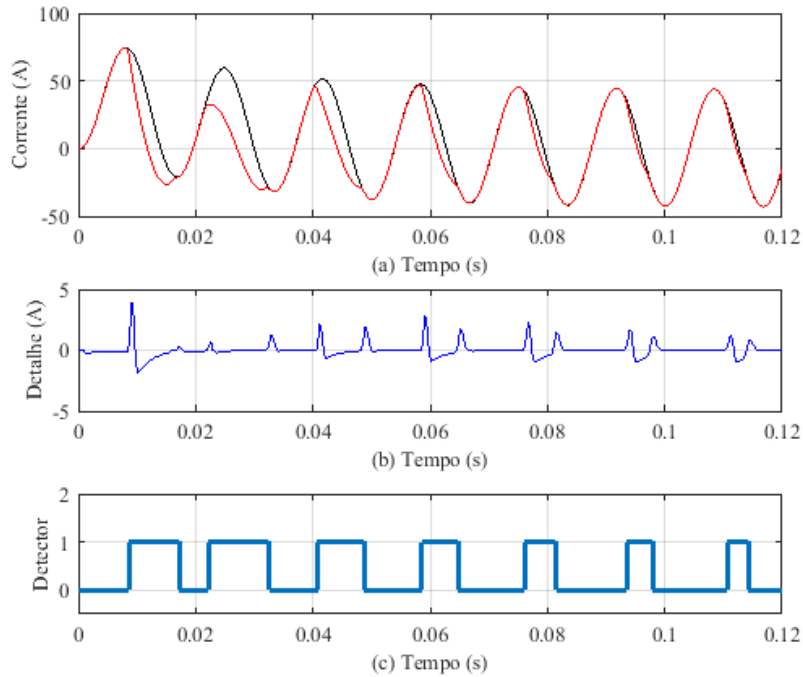
Para o último caso analisado com 0% de fluxo remanescente presente no núcleo do TC, a detecção por Morfologia Matemática identificou adequadamente os períodos de início da saturação durante os cinco intervalos iniciais, atrasando nos dois últimos em duas amostras. Quanto ao fim dos intervalos distorcidos, todos foram detectados de maneira antecipada, com variações entre duas e quatro amostras, conforme a Figura 21.

Para a detecção por meio da Terceira Derivada, representada pela Figura 22, os intervalos que caracterizam o início da saturação foram identificados corretamente no primeiro e no quinto intervalo, não identificando o início no segundo. Já no terceiro, quarto e sexto ciclo, essa detecção ocorreu de forma antecipada em duas amostras, enquanto no último a detecção atrasou em duas. O fim da saturação não foi detectado no primeiro intervalo distorcido, sendo os demais identificados antecipadamente em duas amostras, exceto no segundo ciclo, onde o intervalo de saturação foi determinado corretamente.

Por fim, a Figura 23, representando a detecção pela Técnica Proposta, mostra que esta atuou corretamente, detectando de forma precisa os instantes correspondentes ao início dos ciclos saturados. Porém, os períodos de fim, foram

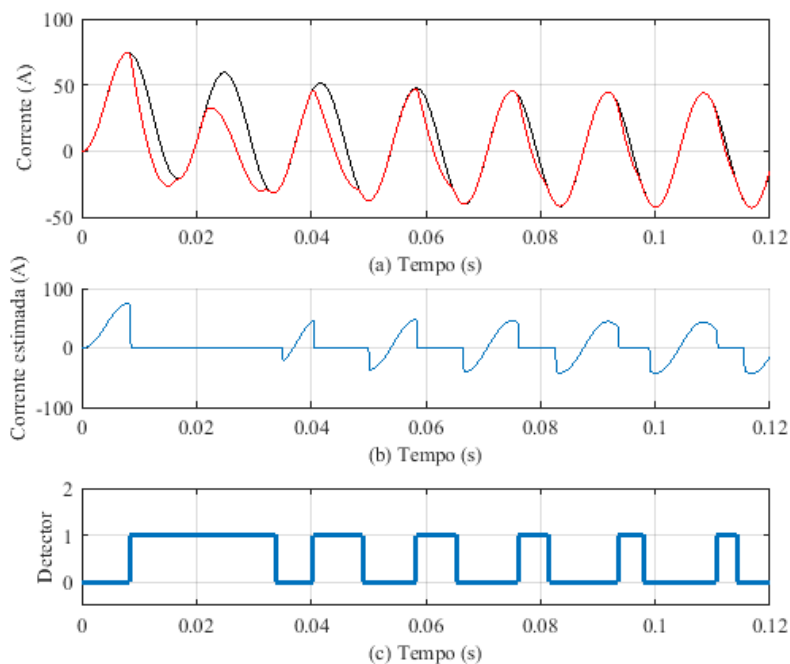
identificados com atrasos a partir do quarto ciclo, com variações de uma e duas amostras.

Figura 21. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.



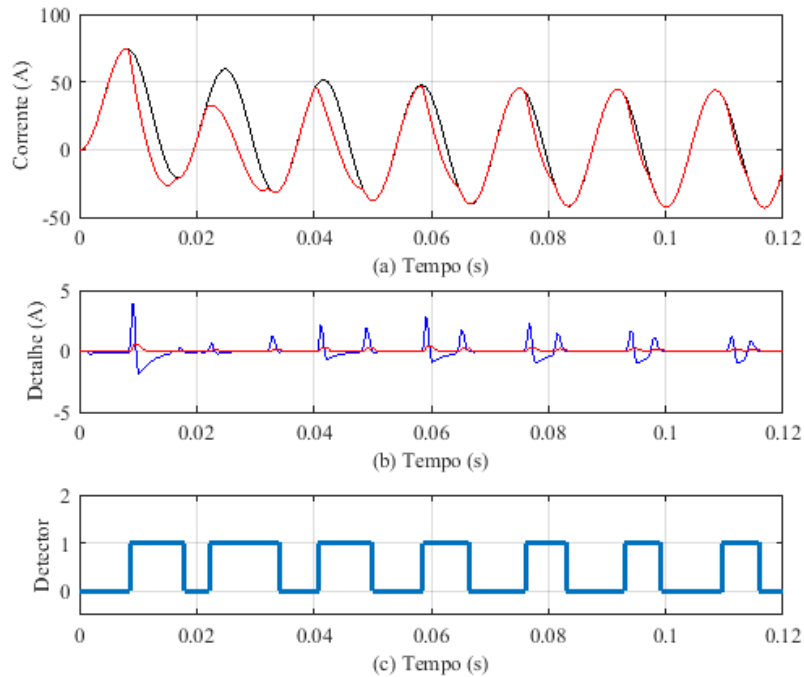
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.



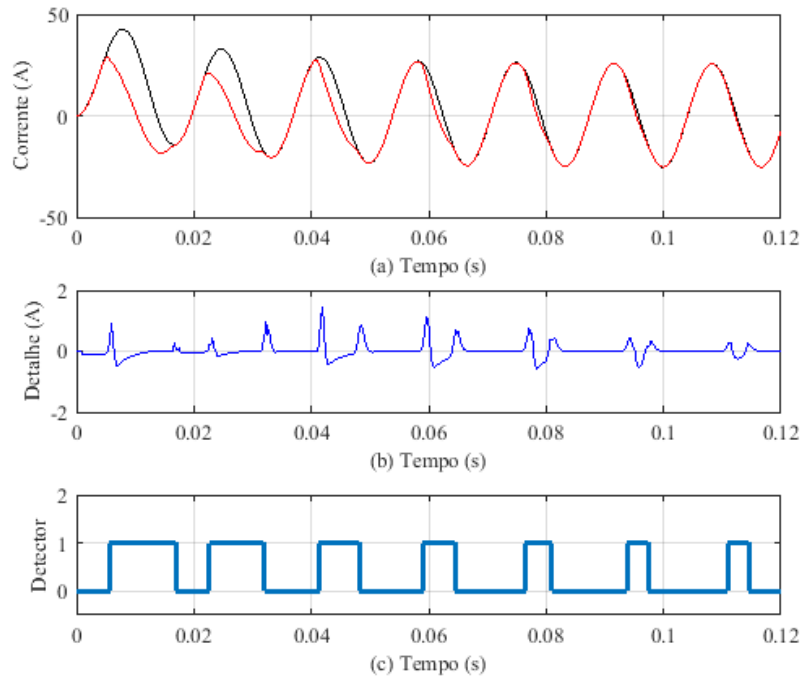
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4. Caso 4: Falta Monofásica, 4Ω de Carga, 4% LT e Fluxo Remanescente de 80%

As Figuras 24, 25 e 26 correspondem à detecção por Morfologia Matemática, Terceira Derivada e o Método de Detecção Proposto, respectivamente. Em todos os casos o detector de saturação determinou todos os sete intervalos distorcidos, atuando corretamente.

Contudo, na Figura 24, nota-se que o início dos intervalos de saturação foram detectados com atraso de uma amostra nos três primeiros ciclos. Nos demais intervalos distorcidos, o atraso na detecção foi de três, quatro e seis amostras, respectivamente. O fim da detecção foi adiantado em todos os ciclos, variando apenas o número de amostras.

Figura 24. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.

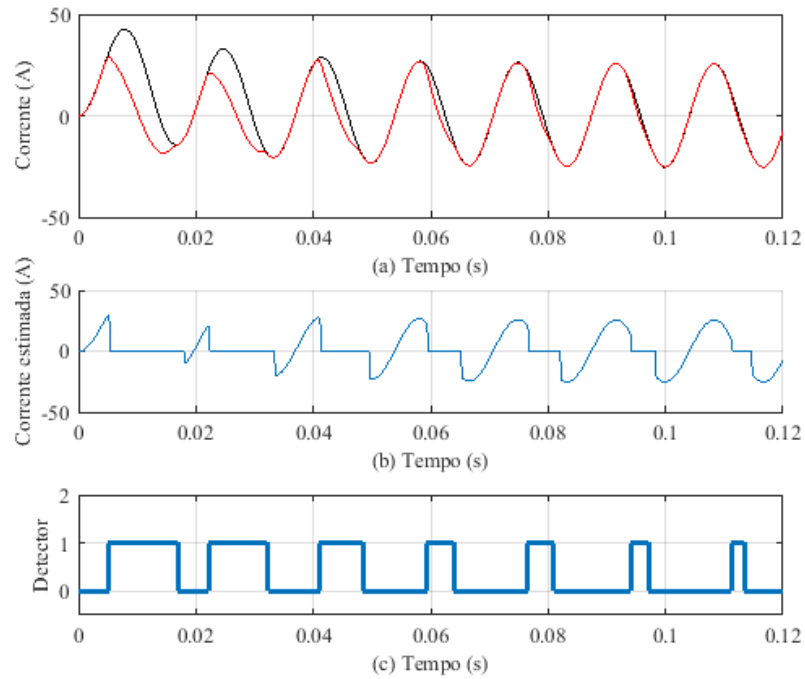


Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto a Terceira Derivada, o início da detecção é adiantado em uma amostra nos dois ciclos iniciais, nos demais a detecção ocorre de forma atrasada, variando de duas a sete amostras. Já o fim dos intervalos distorcidos teve o mesmo comportamento da detecção anterior, porém o número de amostras adiantadas foi maior para este método.

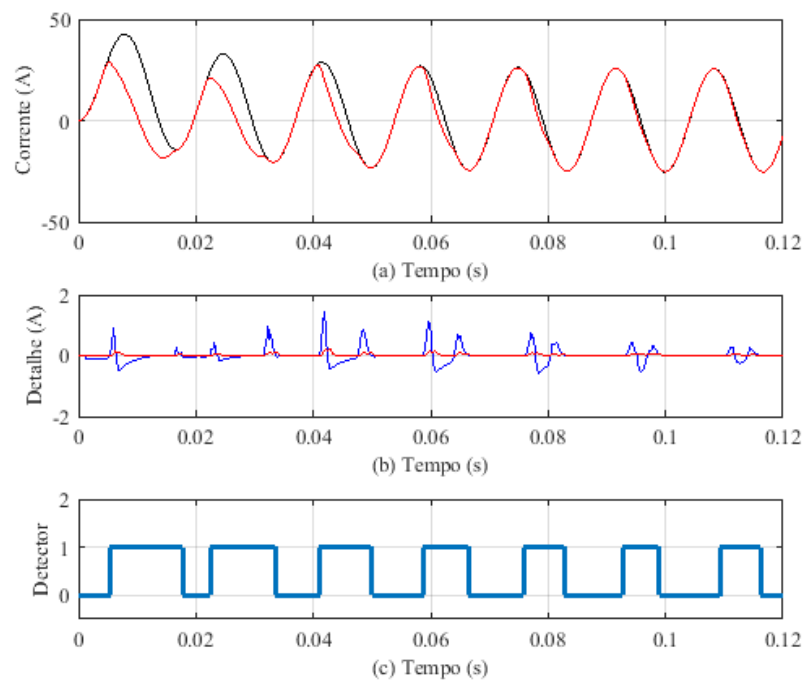
Já a técnica de detecção proposta, teve os períodos de saturação detectados corretamente quanto ao início das distorções em todos os sete ciclos de saturação. Porém, o intervalo menos distorcido (sétimo ciclo) teve o fim detectado com duas amostras de atraso.

Figura 25. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.

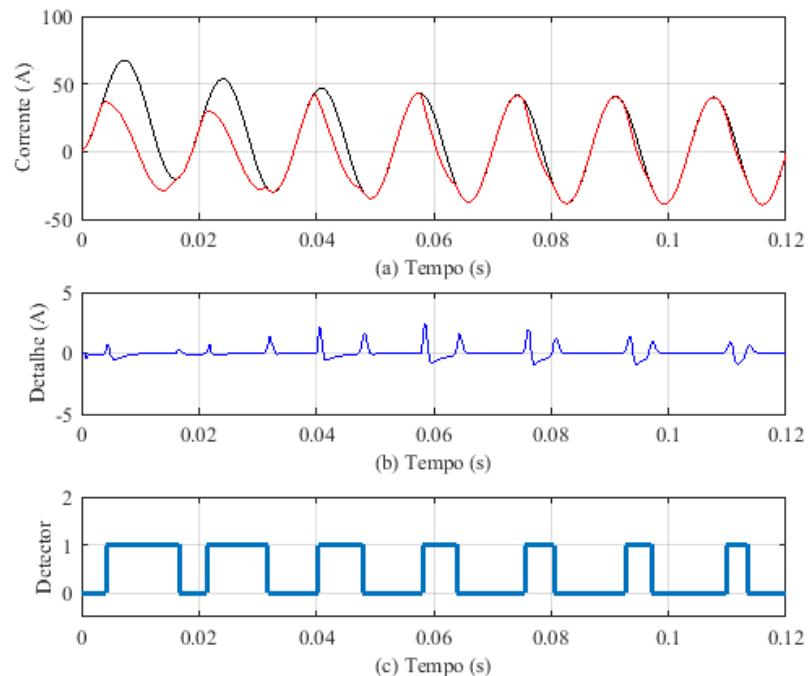


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.5. Caso 5: Falta Bifásica-Terra, 4 Ω de Carga, 4% LT e Fluxo Remanescente de 80%

Para esse caso, a detecção por Morfologia Matemática, identificou adequadamente o início do intervalo de saturação nos quatro ciclos iniciais. Porém, o fim dos mesmos, foi adiantado entre três e cinco amostras. O mesmo ocorreu com os demais intervalos, mas, o início dos intervalos foi atrasado em uma, duas e quatro amostras, respectivamente.

Figura 27. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.

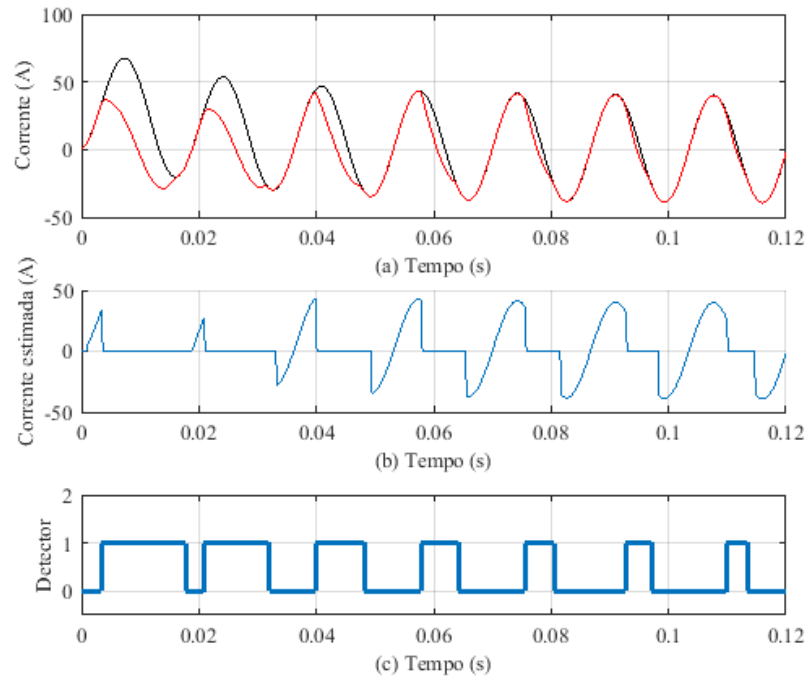


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 28, a qual apresenta a resposta do método da Terceira Derivada, demonstra uma detecção antecipada quanto ao início das distorções nos três ciclos iniciais e uma detecção atrasada nos demais ciclos. Além disso, com exceção do primeiro, todos os períodos que caracterizam o fim da saturação foram localizados de forma adiantada, sendo os intervalos com maior e menor distorção (primeiro e sétimo ciclo) os que apresentaram maior variação na quantidade de amostras adiantadas/atrasadas.

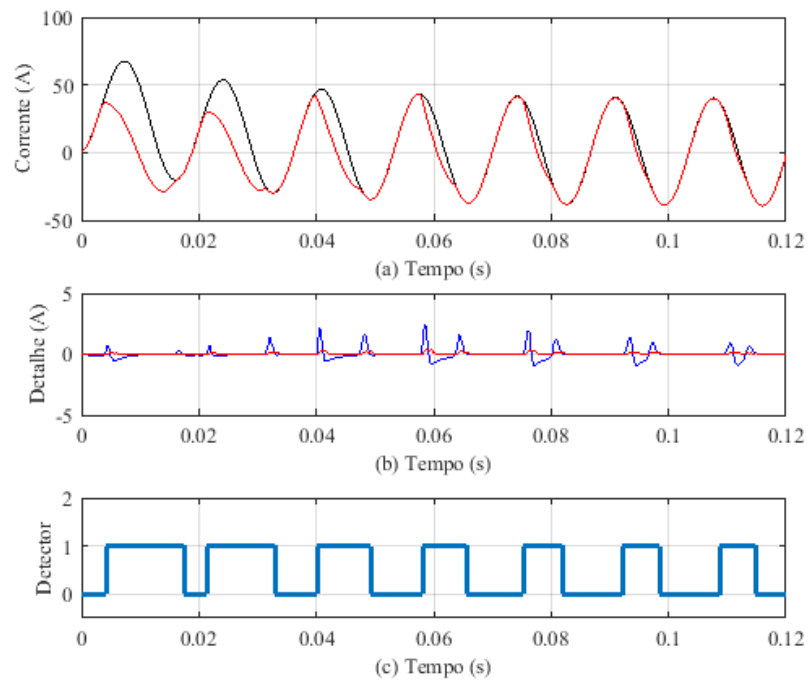
A técnica de detecção proposta, representada na Figura 29, apresentou uma detecção adequada em todos os ciclos. Entretanto, houve um atraso de três amostras quanto ao fim do intervalo distorcido nos dois últimos ciclos.

Figura 28. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.6. Caso 6: Falta Trifásica, 4 Ω de Carga, 4% LT e Fluxo Remanescente de 80%

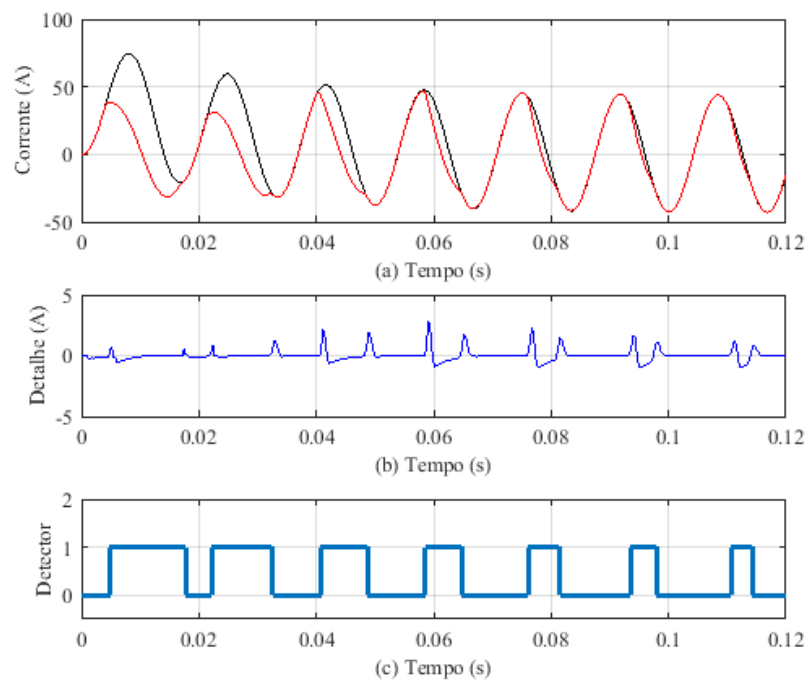
O último caso analisado para uma falta em 4% da LT é referente a um curto-circuito Trifásico, onde todas as técnicas identificaram os intervalos distorcidos.

Na Figura 30, verifica-se que a técnica fundamentada em Morfologia Matemática detectou adequadamente os cinco ciclos iniciais, atrasando o início dos intervalos menos distorcidos (sexto e sétimo). Contudo, todos os finais da detecção por Morfologia Matemática foram antecipados, variando em amostras.

Enquanto isso, a Terceira Derivada, cuja resposta é demonstrada na Figura 31, identificou o início da saturação de forma adiantada durante os três primeiros ciclos, atrasando na detecção dos demais. Quanto ao fim dos intervalos distorcidos, apresentou-se o mesmo comportamento do método anterior, porém, com maior variação de amostras.

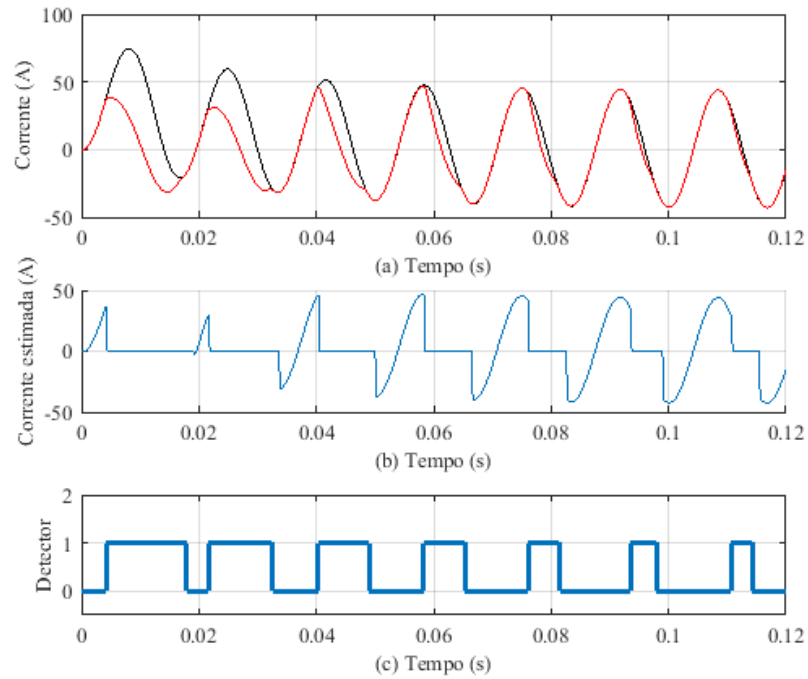
Já a Técnica Proposta detectou adequadamente todos os intervalos distorcidos, tanto para o início quanto para o fim dos intervalos saturados, o que é demonstrado na Figura 32.

Figura 30. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.



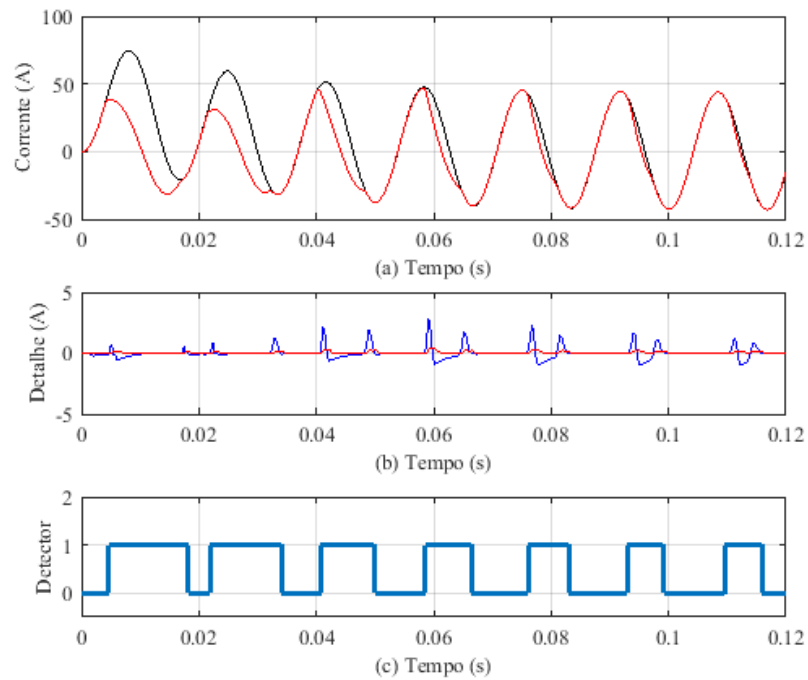
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.



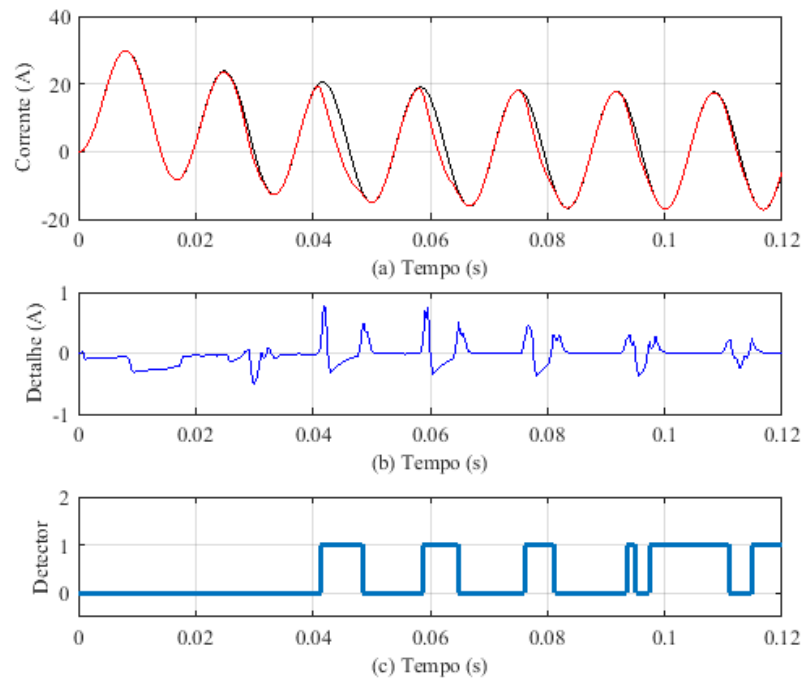
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.7. Caso 7: Falta Trifásica, 4 Ω de Carga, 25% LT e Fluxo Remanescente de 0%

Durante os casos analisados com falta em 25% da LT, duas metodologias não atuaram corretamente, ou seja, não identificaram todos os intervalos distorcidos.

A detecção da Figura 33, por meio da Morfologia Matemática, não identificou as saturações do primeiro e último intervalo. Ainda, atuou com atraso de duas a três amostras nos inícios dos demais ciclos, com antecipação no fim dos mesmos. Ressalta-se que no sexto ciclo, além da técnica não localizar corretamente o fim do período de saturação, a mesma, identificou-o como um início de distorção.

Figura 33. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.



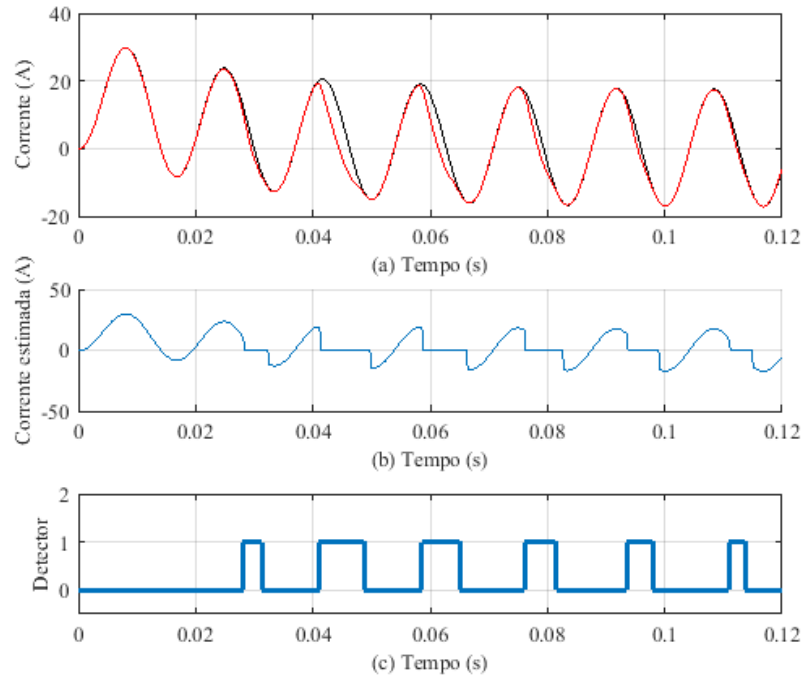
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Terceira Derivada apresentou uma atuação correta identificando todos os trechos distorcidos. Porém, nota-se que os intervalos foram detectados em média com três amostras de atraso após o início dos mesmos. Além disso, todos os instantes que caracterizam o fim da saturação foram identificados antecipadamente, chegando a nove amostras adiantadas no último ciclo. A Figura 34 demonstra a detecção descrita.

Quanto à detecção através da Técnica Proposta, representada pela Figura 35, a mesma atuou corretamente do segundo ao penúltimo intervalo, detectando

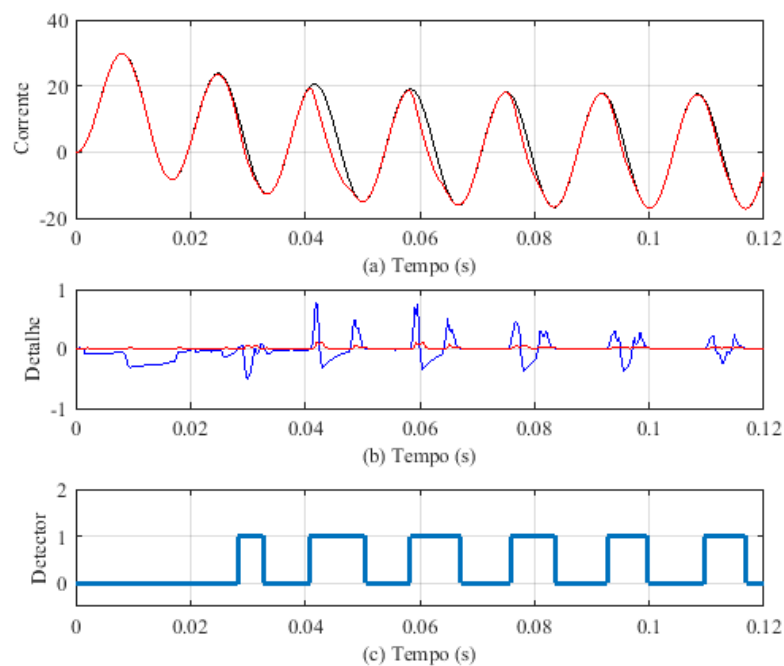
com duas amostras de atraso o início do primeiro trecho distorcido e uma amostra quanto ao fim do sétimo intervalo de saturação.

.Figura 34. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.

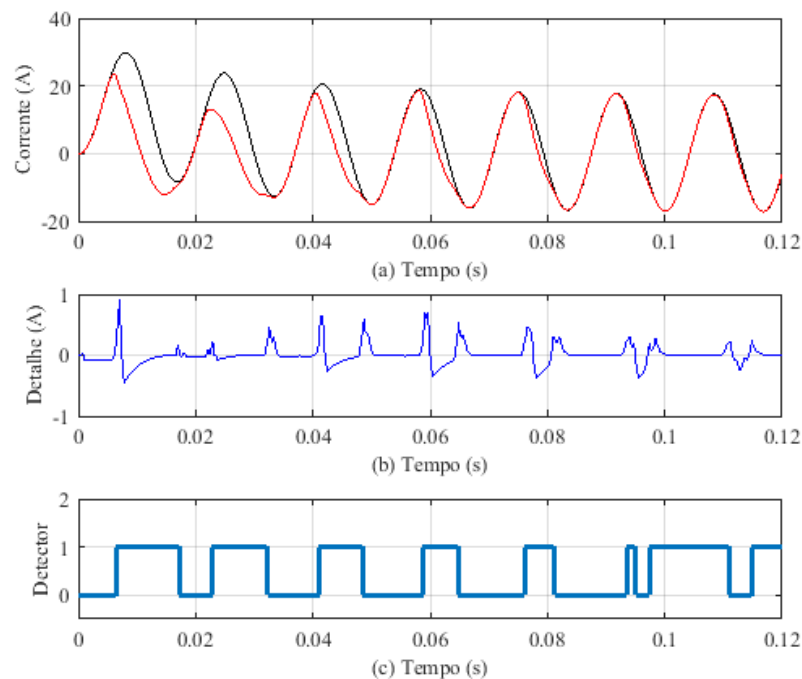


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.8. Caso 8: Falta Trifásica, 4 Ω de Carga, 25% LT e Fluxo Remanescente de 80%

Para o último caso analisado neste Trabalho, a detecção através da Morfologia Matemática atuou corretamente apenas no primeiro intervalo distorcido, atrasando quanto ao início da saturação até o sexto ciclo. Entre o segundo e o quinto intervalo, a detecção antecipou em oito amostras o fim dos mesmos. Ainda, a metodologia não localizou a última distorção e identificou o fim do sexto ciclo como começo do sétimo, conforme pode ser observado na Figura 36.

Figura 36. Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.



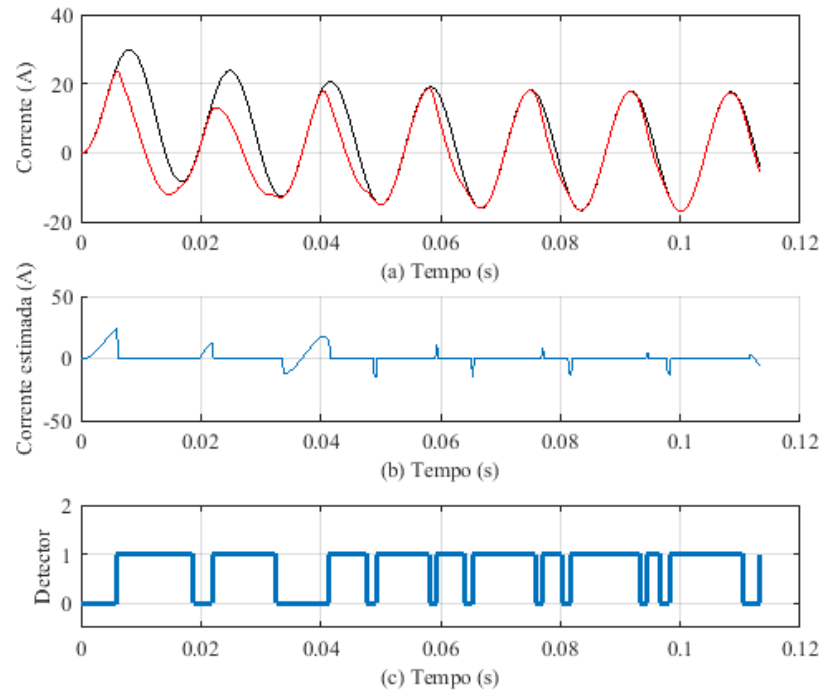
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto à detecção por Terceira Derivada, representada na Figura 37, houve antecipação em duas amostras no início do primeiro ciclo e uma amostra atrasada no fim do mesmo. Durante o segundo intervalo, a detecção ocorreu de forma atrasada com relação ao início e antecipada em seis amostras no fim do mesmo. A partir do terceiro ciclo, a detecção ocorre de forma errada, pois o período que caracteriza o fim do intervalo seguinte foi detectado de forma indevida, prejudicando o restante da atuação.

A atuação da Técnica Proposta foi correta até o sexto período saturado. Porém, o intervalo menos distorcido (sétimo ciclo) teve o fim detectado com uma

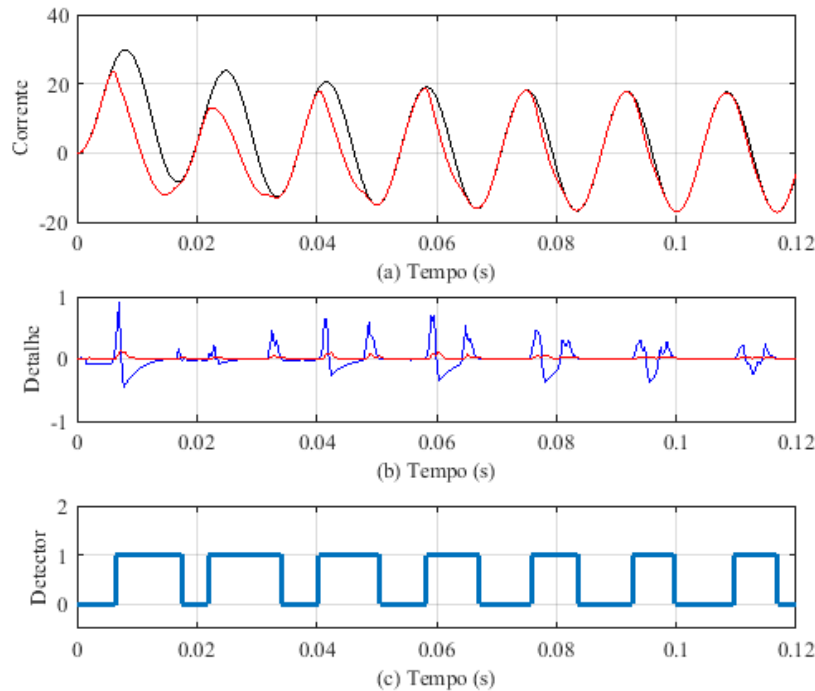
amostra atrasada, o que não provocaria problemas de atuação da proteção que utilizasse essa lógica para determinação dos intervalos distorcidos pela saturação do TC. A Figura 38 demonstra os resultados obtidos pela metodologia proposta, neste caso.

Figura 37. Detecção dos intervalos de saturação pela Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Corrente estimada. (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38. Detecção pela Técnica Proposta. (a) Sinal de corrente secundária ideal (preto) e distorcida. (b) Detalhe do sinal (azul) e desvio padrão (vermelho). (c) Detector de saturação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4. Considerações Finais

Após verificar os resultados apresentados na Seção anterior, constata-se que as técnicas de detecção, identificaram todos os intervalos distorcidos nos casos 1, 2, 4, 5 e 6. Porém, tiveram desempenho diferentes, os quais variaram de acordo com cada caso analisado.

A fim de comparar o efeito da magnitude da corrente de falta, três casos foram analisados sem a presença de fluxo remanescente no núcleo do TC e três com a presença do mesmo. Dessa forma, percebe-se que a saturação ocorre de forma mais severa para faltas trifásicas, ou seja, quando a magnitude da corrente de falta é maior.

Para demonstrar o efeito do fluxo remanescente presente no núcleo do TC, dois casos de curto-circuito trifásico foram analisados, o primeiro sem a presença do fluxo remanescente e o outro considerando 80% do mesmo. Assim, observou-se que a distorção do sinal de corrente ocorre de forma mais severa para o segundo caso, tendo em vista que a presença do fluxo diminui o tempo até a saturação do TC.

Todas as metodologias apresentadas fazem uma comparação entre valores dos sinais amostrados e valores estimados, o que gerou atrasos, antecipação e até a não detecção de diversos períodos de saturação, principalmente nas detecções por Morfologia Matemática e Terceira Derivada.

Desta forma, destaca-se o desempenho apresentado pela técnica de detecção proposta, a qual atuou melhor do que as demais, detectando de forma adequada todos os intervalos de saturação. Assim, comprova-se que o método proposto aprimorou o desempenho da proposta original, fundamentada em Morfologia Matemática, melhorando o desempenho da mesma. Apesar de apresentar um pequeno atraso no fim da detecção em alguns casos, a atuação da metodologia não foi comprometida, tendo em vista que estes trechos apresentam pouca distorção da forma de onda.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Este trabalho apresentou alguns conceitos a cerca da saturação dos transformadores de corrente, como as causas e os efeitos nos principais tipos de proteção.

Dois métodos utilizados para detectar os intervalos da saturação foram apresentados e utilizados no presente Trabalho, bem como foi proposta uma nova técnica de detecção.

As técnicas foram analisadas para sinais de corrente obtidos por simulações computacionais para diferentes níveis de curtos-circuitos. Além disso, foram comparadas quanto ao desempenho para cada caso analisado, a fim de verificar a metodologia mais eficiente quanto à detecção dos instantes que caracterizam o início e fim da saturação.

Assim, como mencionado no capítulo anterior, ressalta-se que a técnica que apresentou a melhor execução foi a detecção proposta, que apesar de ter apresentado poucos atrasos na detecção do fim de alguns intervalos distorcidos, não teve seu desempenho prejudicado. A técnica constituída pela Terceira Derivada obteve o pior desempenho, visto que, demonstrou os inícios da detecção de forma atrasada ou até adiantada em alguns casos e os finais dos intervalos distorcidos de forma adiantada. Além disso, a mesma não identificou alguns trechos distorcidos para dois dos casos analisados neste Trabalho.

Por fim, tendo em vista os resultados alcançados pela técnica proposta, acredita-se que a mesma possa contribuir para uma melhoria da confiabilidade e da robustez dos esquemas de proteção em SEP, uma vez que, com a correta determinação dos intervalos de saturação, pode-se aprimorar a atuação dos relés de proteção.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Em continuação ao estudo desempenhado, sugere-se:

- Aperfeiçoar a técnica de detecção proposta para que não apresente atrasos em nenhum ciclo distorcido;
- Aplicar técnicas de correção dos intervalos de saturação utilizando a técnica proposta;

- Analisar o desempenho das lógicas de relés associadas à técnica proposta para a detecção dos intervalos de saturação, bem como a uma metodologia de compensação das formas de onda durante os trechos distorcidos.

6. REFERÊNCIAS

BRADLEY, D. A.; GRAY, G. B. & O'KELLY, D., **Transient Compensation of Current Transformers**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. 97, n° 4, pp. 1264-1271, Julho/Agosto 1978.

CONNER, E. E.; WENTZ, E. C. & ALLEN, D. W., **Methods for Estimating Transient Performance of Practical Current Transformers for Relaying**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. 94, n° 1, pp. 116-122, Janeiro 1975.

CUMMINS, J. C.; YU, D. C. & KOJOVIC, Lj. A., **Simplified Artificial Neural Network Structure with the Current Transformer Saturation Detector Provides a Good Estimate of Primary Currents**. Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Meeting, Vol. 3, pp. 1373-1378, Seattle, WA, USA, Julho 2000.

EL-NAGGAR, K. M. & GILANY, M. I., **A Discrete Dynamic Filter for Detecting and Compensating CT Saturation**. Electric Power Systems Research, 77, pp. 527-533, 2007.

FELIPE, B.; SANTOS, E. M.; RAMOS, F. C.; BORDINHÃO, A. B.; FAGUNDES, A. R. e MACHADO, N. P. **Deteção da Saturação de Transformadores de Corrente para Proteção de SEP**. 9º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão. Universidade Federal do Pampa, 2017.

HONG, Y. Y. & WEI, D. W., **Compensation of Distorted Secondary Current Caused by Saturation and Remanence in a Current Transformer**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 25, n° 1, pp. 47-54, Janeiro 2010.

HONG, Y.-Y. & CHIAN, P.-C. C., **Detection and Correction of Distorted Current Transformer Current Using Wavelet Transform and Artificial Intelligence**. IET Generation, Transmission and Distribution. Vol. 2, n° 4, pp. 566-575, Julho 2008.

IEEE Std C37.110-2007. **IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes**. Maio 2008.

IEEE Std C57.13-1993. **IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers**. Junho 1993.

KANG, Y. C.; LIM, U. J.; KANG, S. H. & CROSSLEY, P. A., **Compensation of the**

Distortion in the Secondary Current Caused by Saturation and Remanence in a CT. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 19, n° 4, pp. 1642-1649, Outubro 2004.

KANG, Y. C.; PARK, J. K.; KANG, S. H.; JOHNS, A. T. & AGGARWAL, R. K., **An Algorithm for Compensating Secondary Currents of Current Transformers.** IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 12, n° 1, pp. 116-124, Janeiro 1997.

KASZTENNY, B.; ROSOŁOWSKI, E.; LUKOWICZ, M. & IZYKOWSKI, J., **Current Related Relaying Algorithms Immune to Saturation.** Proceedings of the 6th International Conference on Developments in Power System Protection, pp. 365-368, Nottingham, UK, Março 1997.

KEZUNOVIC, M.; KOJOVIC, Lj.; ABUR, A. et al., **Experimental Evaluation of EMTBased Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study.** IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 9, n° 1, pp. 405-413, Janeiro 1994.

LI, F.; LI, Y. & AGGARWAL, R. K., **Combined Wavelet Transform and Regression Technique for Secondary Current Compensation of Current Transformers.** IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution. Vol. 149, n° 4, pp. 497-503, Julho 2002.

LU Z.; SMITH, J. S. & WU, Q. H., **Morphological Lifting Scheme for Current Transformer Saturation Detetion and Compensation.** IEEE Transaction on Circuits and Systems – I: Regular Papers. Vol. 55, n° 10, pp. 3349-3357, Novembro 2008.

MONARO, R. M.; SILVA, R. C. S.; VIEIRA JÚNIOR, J. C. M. & COURY, D. V., **Detecção e Correção de Sinais de Transformadores de Corrente Distorcidos pela Saturação Através de Redes Neurais Artificiais.** XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito- MS, Brasil, Setembro 2010.

OZGONENEL, O.; TERZI, U. K. & GUNEY, I., **A Different Algorithm for Correcting Secondary Current of Current Transformer.** Proceedings of the 10th IET International Conference on Developments in Power System Protection – Managing the Change, pp. 1-5, Manchester, UK, Março/Abril 2010.

PAN, J.; VU, K. & HU, Y., **An Efficient Compensation Algorithm for Current Transformer Saturation Effects.** IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 19, n° 4, pp. 1623-1628, Outubro 2004.

PEREIRA, F.A.; GUERRA, F. C. F.; COSTA, E. G. da; **Uma Nova Técnica de Correção de Correntes Distorcidas no Enrolamento Secundário de TCs.** 2012. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2012;

POWELL Jr., L. J., **Current Transformer Burden and Saturation.** IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 15, n° 3, pp. 294-303, Maio/Junho 1979.

REBIZANT, W. & BEJMERT, D., **Current-Transformer Saturation Detection with Genetically Optimized Neural Networks.** IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 22, n° 2, pp. 820-827, Abril 2007.

REBIZANT, W.; WISZNIEWSKI A. & SCHIEL, L., **CT Saturation Correction Based on the Estimated CT Saturation Time Constant.** Proceedings of the IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection DPSP 2008, pp. 174-179, Glasgow, UK, Março 2008.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; LUKOWICZ, M. & ROSOLOWSKI, E., **Application of ANN Methods for Instrument Transformer Correction in Transmission Line Protection.** Proceedings of the 7th International Conference on Developments in Power System Protection, pp. 303-306, Amsterdam, Netherlands, Abril 2001.

SANTOS, Eduardo Machado. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Material de apoio à disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete – Curso de Engenharia Elétrica. (2017, p 97 e 98).

SANTOS, Eduardo Machado. **Métodos para correção das distorções da forma de onda secundária causadas pela saturação de transformadores de corrente para serviço de proteção.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

SEGATTO, E. C. & COURRY, D. V., **Redes Neurais Artificiais Recorrentes Aplicadas na Correção de Sinais Distorcidos pela Saturação de Transformadores de Corrente.** Revista Controle & Automação. Vol. 17, n° 4, Outubro, Novembro e Dezembro 2006.

SILVA, Rogério Cesar Serpião. **Proteção Diferencial de Geradores Síncronos: O uso de redes neurais artificiais para identificação e correção da saturação dos transformadores de corrente.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SHETTINO, Bruno Montesano. **Uma proposta para detecção e compensação dos efeitos causados pela saturação dos núcleos dos Transformadores de Corrente utilizados em circuitos de proteção.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

SHETTINO, Bruno Montesano. **Métodos para detecção e compensação dos efeitos causados pela saturação dos TCs de proteção com meios adaptativos para mitigação da influência do ruído e dos desvios de frequência.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.

STACHEL, P. & SCHEGNER, P., **Detection and Correction of Current Transformer Saturation Effects in Secondary Current Signals.** Proceedings of the 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-6, Calgary, AB, Canada, Julho 2009.

SEELEY, H.T. **The effect of current-transformer residual magnetism on balanced-current differential relays.** AIEE Trans., 62: 164-169, 1943.

SOHIER, J.; GAILLET, B.; SANIT L. **Comportement des transformateurs de courant en régime asymétrique de court-circuit.** *Revue Générale de L'Électricité*, 75: 803-816, 1966.

VANDERLECK, J. M.; ALLEN, D. W.; BERDY, J. *et al.*, **Transient Response of Current Transformers.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. 96, n° 6, pp. 1809-1814, Novembro/Dezembro 1977.

WISZNIEWSKI A.; REBIZANT, W. & SCHIEL, L., **Correction of Current Transformer Transient Performance.** IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 23, n° 2, pp. 624-632, Abril 2008.

WISZNIEWSKI, A. & SZAFRAN, J., **Distance Digital Algorithm Immune to Saturation of Current Transformers.** Proceedings of the 4th International Conference on Developments in Power Protection, pp. 196-199, Edinburg, UK, Abril 1989.

YANG, L.; DOLLOFF, P. A. & PHADKE, A. G., **A Microprocessor Based Bus Relay Using a Current Transformer Saturation Detector.** Proceedings of the 22nd

Annual North American Power Symposium, pp. 193-202, Auburn, AL, USA, Outubro 1990.

YU, D. C.; CUMMINS, J. C.; WANG, Z. *et al.*, **Neural network for Current Transformer Saturation Correction**. Proceedings of the 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference, pp. 441-446, New Orleans, LA, USA, Abril 1999.

ZADEH, H. K. & PASAND, M. S., **An ANN Based Algorithm for Correction of Saturated CT Secondary Current**. Proceedings of the 39th International Universities Power Engineering Conference, Vol. 1, pp. 468-472, Setembro 2004.