

BRUNO BRONDANI TOLLER

**DETECÇÃO DA SATURAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE E SEU
IMPACTO SOBRE A QUALIDADE DO SINAL CORRIGIDO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, de Alegrete.

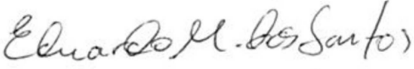


Orientador: Eduardo Machado dos Santos

**ALEGRETE
2012**

Autoria: Bruno Brondani Toller

Título: Detecção da saturação de transformadores de corrente e seu impacto sobre a qualidade do sinal corrigido.

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete.

Os componentes da banca de avaliação, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado.				
	Nome	Titulação	Assinatura	Instituição
1	Eduardo Machado dos Santos	Me		UNIPAMPA
2	Diego Berlezi Ramos	Dr.		UNIPAMPA
3	José Wagner Maciel Kaehler	Dr.		UNIPAMPA

Data da aprovação: 27 de junho de 2012.

*“Dedico este trabalho a minha
família em especial meus pais, pois sem eles
nada disso seria possível”.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Eduardo Machado dos Santos pelos conhecimentos transmitidos durante a orientação, bem como a sua ajuda frente às dificuldades.

Agradeço a todos aqueles que acreditaram em mim e no meu potencial, e aqueles que de uma forma ou outra contribuíram decisivamente na consecução deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Argemiro Romeu Toller e Maria Sueli Brondani Toller por fazerem de mim quem eu sou hoje, e pela força, perseverança e paciência.

Agradeço aos meus irmãos, Marcelo Brondani Toller e Aline Brondani Toller pela companhia e apoio em todos esses anos e a todos meus familiares. Sem esquecer-me de agradecer a Deus por ter me dado forças para sempre seguir em frente.

Os problemas sempre colocam o homem em situação ou ambiente diferente e, de maneira diversa de até então, fortalecem sua alma. Os problemas existem para ser solucionados, e não há nenhum problema que não tenha solução. Não temos de temê-los. A vida é dinâmica e nos faz descortinar sempre uma nova faceta.

Masaharu Taniguchi

RESUMO

Este trabalho avalia o desempenho de uma metodologia de compensação dos intervalos distorcidos da forma de onda de sinais de corrente secundário, que ocorrem em virtude da saturação do núcleo de transformadores de corrente, quando associada a três técnicas de detecção desses intervalos. Tanto a metodologia de compensação, quanto as técnicas de detecção, são apresentadas didaticamente e foram escolhidas por apresentarem resultados promissores, sendo bem aceitas pelos pesquisadores de área.

Foram realizadas simulações computacionais de curtos-circuitos, usando o software EMTP-ATP, para a obtenção dos sinais de corrente. As metodologias de detecção foram implementadas no software Matlab® e avaliadas em termos do reconhecimento dos intervalos distorcidos e de velocidade de resposta. Já o método de compensação foi avaliado em termos da precisão da compensação e do tempo de processamento. Foram realizadas simulações envolvendo diferentes tipos de curto-circuito e diferentes valores de carregamento do TC. Além disso, variou-se o fluxo remanescente do núcleo do transformador de corrente e foi verificado que quanto maior for o seu valor menor é o tempo até a saturação do TC.

Cálculos de erro transitório e a utilização de um filtro de Fourier de ciclo completo para obtenção dos valores RMS da compensação foram tomados como base para a análise qualitativa do desempenho das técnicas de correção. Foi observado que diferentes instantes de detecção dos trechos distorcidos propiciam diferentes margens de erro à metodologia de compensação associada ao detector, evidenciando a dependência da correção em relação à precisão da detecção dos intervalos distorcidos por saturação.

Palavras-chave: Correção; Detecção; Forma de Onda Distorcida; Saturação, Transformador de Corrente, Impactos Sobre a Qualidade do Sinal Corrigido.

ABSTRACT

This paper evaluates the performance of a method to compensate the distorted waveform intervals secondary current signals, which occur due to the saturation of current transformers (CTs) core, when associated with three techniques for detection of those intervals. Both the method of compensation, as the detection techniques are presented didactically and were chosen because they presented promising results, being well accepted by the researchers.

Short circuits were simulated using software EMTP-ATP to obtain the current signals. The detection methodologies were implemented in Matlab[®] and evaluated in terms of recognition of distorted ranges and speed of response. Also the compensation method was evaluated in terms of accuracy and processing time. Simulations were conducted involving different types of short circuit and different values for CT burden. Moreover, the remanent flux in the CT core was varied and it was found that the higher is the value of remanent flux the lower the time to CT saturation.

Calculations of transient error and the use of a Fourier filter to obtain the RMS values of the compensation were taken as basis for the qualitative analysis of the performance of the correction technique. It was observed that different instants of detection of distorted parts provide different margins of error to the method of compensation associated with the detector, showing the dependence of the correction to the accuracy of the saturation detectors.

Keywords: Correction, Detection, Distorted Waveform, Saturation, Impacts on the Quality of Compensated Signal.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Circuito equivalente simplificado de um TC e a sua carga conectada	22
Figura 2 - Curva de excitação para TCs da classe C com diferentes tipos de relações de transformação.	23
Figura 3 - TC tipo primário enrolado	27
Figura 4 - TC tipo janela	27
Figura 5 - TC tipo bucha	28
Figura 6 - Circuito simplificado do TC.	29
Figura 7 - Formas de onda da corrente secundária para um TC saturado e não saturado.	30
Figura 8 - Comportamento do fluxo para corrente simétrica	30
Figura 9 - Comportamento do fluxo para corrente assimétrica	31
Figura 10 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Primeira função diferença (del1). (c) Segunda função diferença (del2). (d) Terceira função diferença (del3). (e) Detector de saturação.	37
Figura 11- Detecção do início do intervalo de saturação	38
Figura 12 - Detecção dos intervalos de saturação através da Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e distorcida. (b) Detector de saturação.	39
Figura 13 - Detecção dos intervalos de saturação através da Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.	41
Figura 14 - Sistema teste.	45
Figura 15 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Terceira função-diferença (del3). (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.	47
Figura 16 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	48

Figura 17 - Resultado para a detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.	49
Figura 18 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	49
Figura 19 - Resultado para a detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.	50
Figura 20 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	51
Figura 21 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Terceira função-diferença (del3). (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.	52
Figura 22 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	52
Figura 23 - Resultado para a detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.	53
Figura 24 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	53
Figura 25 - Resultado para a detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.	54
Figura 26 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	55
Figura 27 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Terceira função-diferença (del3). (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.	56
Figura 28 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	56

Figura 29 - Resultado para a detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.	57
Figura 30 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	58
Figura 31 - Resultado para a detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.	58
Figura 32 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	59
Figura 33 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Terceira função-diferença (del3). (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.	60
Figura 34 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	61
Figura 35 - Resultado para a detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.	61
Figura 36 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	62
Figura 37 - Resultado para a detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.	63
Figura 38 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	63
Figura 39 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Terceira função-diferença (del3). (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.	64
Figura 40 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	65

Figura 41 - Resultado para a detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.	65
Figura 42 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	66
Figura 43 - Resultado para a detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.	66
Figura 44 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	67
Figura 45 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Terceira função-diferença (del3). (c) Detector de saturação. (f) Erro transitório percentual.	68
Figura 46 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	69
Figura 47 - Resultado para a detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.	69
Figura 48 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	70
Figura 49 - Resultado para a detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.	71
Figura 50 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.	71
Figura 51 - Sistema Teste	81

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
SUMÁRIO	12
Capítulo 1 INTRODUÇÃO	15
1.1 <i>Considerações Gerais</i>	15
1.2 <i>Objetivos do Trabalho</i>	15
1.3 <i>Motivação</i>	16
1.4 <i>Revisão Bibliográfica</i>	16
1.5 <i>Organização dos Capítulos</i>	18
Capítulo 2 FUNDAMENTOS DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE	20
2.1 <i>Considerações Gerais</i>	20
2.2 <i>Modelagem do Transformador de Corrente</i>	20
2.2.1 <i>Transformador de Corrente (TC)</i>	20
2.2.2 <i>Circuito Equivalente do Transformador de Corrente</i>	21
2.2.3 <i>Fator de Sobrecorrente do TC</i>	22
2.2.4 <i>Curva Característica de Excitação Secundária do TC</i>	23
2.2.5 <i>Tensão de Ponto de Joelho</i>	24
2.2.6 <i>Classificação dos TCs quanto a Exatidão</i>	24
2.2.6.1 <i>Classe de Exatidão do TC pela ANSI</i>	24
2.2.6.2 <i>Classe de Exatidão do TC pela ABNT</i>	25
2.2.7 <i>Cargas Padrões para TCs de Proteção</i>	26
2.2.8 <i>Principais Tipos Construtivos de TCs</i>	27
2.3 <i>Dimensionamento do TC quanto a sua Relação de Transformação</i>	28
2.3.1 <i>Critério da Corrente de Carga Nominal do Alimentador</i>	28
2.3.2 <i>Critério do Curto-Circuito</i>	28
2.4 <i>Saturação dos TCs</i>	29
2.4.1 <i>Características Dinâmicas</i>	30
2.4.2.1 <i>Variação do Fluxo com Corrente Primária Assimétrica</i>	30
2.4.2.2 <i>Tensão de Saturação V_x</i>	31
2.4.2.3 <i>Critérios para evitar a saturação</i>	31
2.4.2.4 <i>Causas da saturação</i>	32
2.4.2 <i>Efeitos do Fluxo Remanescente</i>	33
2.4.3 <i>Efeitos da Saturação Sobre os Principais Tipos de Proteção</i>	33

2.5	<i>Considerações Finais</i>	34
Capítulo 3 MÉTODOS DE DETECÇÃO E COMPENSAÇÃO DOS INTERVALOS DISTORCIDOS PELA SATURAÇÃO		35
3.1	<i>Considerações Gerais</i>	35
3.2	<i>Metodologias de Detecção</i>	36
3.2.1	<i>Detecção da Saturação a Partir das Funções Diferença do Sinal Analisado</i>	36
3.2.2	<i>Detecção da Saturação Através da Terceira Derivada</i>	38
3.2.3	<i>Detecção da Saturação Através da Morfologia Matemática</i>	39
3.3	<i>Metodologia de Compensação</i>	42
3.4	<i>Considerações Finais</i>	43
Capítulo 4 RESULTADOS		45
4.1	<i>Considerações Iniciais</i>	45
4.2	<i>Sistema Teste</i>	45
4.3	<i>Casos Simulados</i>	46
4.3.1	<i>Falta Trifásica: Carga Resistiva de 4Ω e 50% Remanescente</i>	46
4.3.1.1	<i>Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação através das Funções-Diferença do Sinal Analisado</i>	47
4.3.1.2	<i>Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação pela Saturação por Morfologia Matemática</i>	48
4.3.1.3	<i>Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação Através da Terceira Derivada</i> 50	
4.3.2	<i>Falta Trifásica: Carga Resistiva de 4Ω e 80% Remanescente</i>	51
4.3.2.1	<i>Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação através das Funções-Diferença do Sinal Analisado</i>	51
4.3.2.2	<i>Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Morfologia Matemática</i>	52
4.3.2.3	<i>Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação Através da Terceira Derivada</i>	54
4.3.3	<i>Falta Trifásica: Carga Resistiva de 10Ω e 50% Remanescente</i>	55
4.3.3.1	<i>Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação através das Funções-Diferença do Sinal Analisado</i>	55
4.3.3.2	<i>Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação pela Saturação por Morfologia Matemática</i>	57
4.3.3.3	<i>Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação Através da Terceira Derivada</i> 58	
4.3.4	<i>Falta Trifásica: Carga Resistiva de 10Ω e 80% Remanescente</i>	59
4.3.4.1	<i>Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Funções-Diferença do Sinal Analisado</i>	60
4.3.4.2	<i>Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Morfologia Matemática</i>	61

4.3.4.3	Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação Através da Terceira Derivada.....	62
4.3.5	Falta Monofásica: Carga Resistiva de 4Ω e 50% Remanescente.....	63
4.3.5.1	Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Funções-Diferença do Sinal Analisado	64
4.3.5.2	Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Morfologia Matemática.....	65
4.3.5.3	Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação Através da Terceira Derivada.....	66
4.3.6	Falta Bifásica: Carga Resistiva de 10Ω e 50% Remanescente.....	67
4.3.6.1	Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Funções-Diferença do Sinal Analisado	68
4.3.6.2	Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Morfologia Matemática.....	69
4.3.6.3	Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação Através da Terceira Derivada.....	70
4.4	Tempos de Processamento das Metodologias	71
4.5	Resultados Resumidos.....	72
4.6	Considerações Finais.....	74
	Capítulo 5 CONCLUSÕES.....	76
5.1	Conclusões	76
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
	ANEXOS.....	81
	ANEXO 1	81
	ANEXO 2	83
	ANEXO 3.....	84
	ANEXO 4.....	85
	ANEXO 5.....	86

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Os transformadores de corrente (TCs) devem reproduzir proporcionalmente, em seu circuito secundário, a corrente de seu circuito primário, permitindo o acesso aos sinais de corrente da rede.

Como os núcleos desses transformadores são feitos de material ferromagnético, eles estão sujeitos a um fenômeno físico conhecido como saturação. Um TC com núcleo saturado distorce a forma de onda do sinal no terminal secundário, podendo causar a má atuação dos relés a ele conectados.

A saturação dos transformadores de corrente ocorre principalmente em função do fluxo remanescente no núcleo antes da falta. Outros fatores como as componentes unidirecionais das correntes de curto-circuito, a carga do TC e até o mau dimensionamento do mesmo são favoráveis à saturação.

1.2 Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo geral tratar assuntos relacionados à saturação dos transformadores de corrente, usados para proteção dos sistemas elétricos de potência, avaliando a aplicação de três metodologias de detecção da saturação dos TCs e uma metodologia de compensação dos intervalos distorcidos.

Como objetivos específicos do trabalho têm-se:

- Descrever três metodologias de detecção e uma metodologia de compensação dos intervalos distorcidos.
- Avaliar o desempenho das metodologias através de simulações computacionais.

- Verificar o impacto das metodologias de detecção sobre a qualidade do sinal corrigido e destacar algumas vantagens e desvantagens de cada método.

1.3 Motivação

O objetivo dos relés é proteger com garantia de sensibilidade, seletividade, rapidez, confiabilidade e robustez, garantindo a vida útil dos equipamentos ligados ao sistema elétrico de potência. Porém, em muitas situações os mesmos podem atuar de maneira indevida ou até mesmo não atuarem. Isso pode ocorrer em decorrência de um fenômeno conhecido como saturação, que afeta o núcleo dos transformadores de corrente.

O fenômeno da saturação é estudado desde os anos 20, com trabalhos publicados discutindo as soluções para combater esse problema nos esquemas de proteção.

Com o avanço da tecnologia computacional nas últimas décadas, pesquisas abordando as diversas conseqüências da saturação sobre os esquemas de proteção foram publicadas, como por exemplo, o estudo divulgado em KEZUNOVIC et al. (1994), sobre modelos de transformadores de corrente para estudo de transitórios e seus impactos sobre os relés de proteção. Além disso, com o início da utilização dos relés digitais, algumas técnicas para detecção das distorções causadas pela saturação foram difundidas na literatura. Algumas dessas metodologias são robustas e de fácil implementação, sendo capazes de amenizar os efeitos causados pela saturação.

Nesse contexto, foi realizado o presente estudo, com o objetivo de se obter uma análise crítica sobre três detectores de saturação e seus impactos sobre a qualidade do sinal corrigido.

1.4 Revisão Bibliográfica

Para a elaboração deste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica onde se verificou a existência de diversas metodologias para a detecção e compensação dos intervalos distorcidos pela saturação dos transformadores de corrente. Assim serão apresentadas algumas das principais técnicas usadas para amenizar o impacto da saturação dos transformadores de corrente nos relés de proteção.

YANG et al. (1990) propuseram uma metodologia de detecção fundamentada na diferença entre amostras consecutivas do sinal de corrente secundário.

Também, LI et al. (2002), combinaram a Transformada Wavelet com uma técnica da regressão para a compensação dos trechos distorcidos pela saturação dos transformadores de corrente.

KANG et al. (2004) publicaram uma técnica para a detecção da saturação dos transformadores de corrente fundamentada na análise das funções-diferença do sinal de corrente secundária e compensação dos intervalos distorcidos pela adição da corrente de magnetização ao valor de corrente secundária referente ao intervalo distorcido por saturação. No mesmo ano, PAN et al. (2004) propuseram uma metodologia de compensação dos intervalos distorcidos através de Ajustes de Curvas por Mínimos Quadrados.

VILLAMAGNA & CROSSLEY (2006), apresentaram uma metodologia para a adaptação de relés diferenciais durante os trechos em que os transformadores de corrente encontram-se saturados.

Além disso, EL-NAGGAR & GILANY (2007) propuseram um filtro de Kalman para detecção dos intervalos distorcidos pela saturação dos TCs.

Ainda, WISZNIEWSKI et al. (2008) publicaram uma metodologia fundamentada na estimativa de pontos futuros através da terceira derivada do sinal analisado. Os pontos estimados são comparados com os valores amostrados do sinal de corrente. A detecção do intervalo saturado é atingida quando o erro da estimativa for maior que um valor limite pré-determinado para esse erro. Para a correção do sinal são utilizados alguns desses valores estimados.

REBIZANT et al. (2008) propuseram uma metodologia de correção dos intervalos distorcidos baseada na estimação da constante de tempo para a saturação do TC. Ainda em 2008, LU et al. (2008) publicam um metodologia fundamentada na estimativa de pontos futuros usando os operadores da Morfologia Matemática. Os autores também propõem uma metodologia de correção dos trechos distorcidos pela adição da corrente de magnetização, que é estimada para cada ponto do trecho distorcido.

Já em 2009, YU et al. propuseram um método adaptativo baseado na utilização de um filtro mímico para a detecção da saturação dos transformadores de corrente e correção por Mínimos Quadrados. Além disso, em GUERRA et al. (2009) é proposto um método de

correção numérica para correntes secundárias distorcidas pela saturação de transformadores de corrente, que é fundamentado na aquisição dos valores da corrente secundária, somando-se aos mesmos os valores correspondentes de corrente de excitação dos trechos distorcidos.

Uma metodologia para detecção e correção dos intervalos distorcidos é proposto em STACHEL et al. (2009). O método de detecção consiste na combinação de dois algoritmos. O primeiro analisa o sinal de corrente secundária no domínio da frequência, usando a Transformada Discreta de Fourier (TDF) e o segundo, analisa o sinal de corrente no domínio do tempo. Os resultados dos dois algoritmos são combinados para obter os incrementos do sinal que são usados na detecção dos trechos distorcidos. Para a correção do sinal distorcido os autores propõem um algoritmo de ajuste de curvas.

Por fim, HONG & WEI (2010) propuseram uma metodologia de detecção fundamentada na Transformada Wavelet Discreta e correção por regressão não linear combinada com lógica Fuzzy. Além disso, uma metodologia de correção e detecção da saturação de transformadores de corrente, usando as Redes Neurais Artificiais é proposta em MONARO et al. (2010).

1.5 Organização dos Capítulos

No Capítulo 2, serão abordados os principais fundamentos dos transformadores de corrente, além, de uma descrição sobre TCs e sobre o fenômeno da saturação, relacionando suas causas e consequências sobre o comportamento dos relés de proteção. Também são descritas algumas formas de amenizar os efeitos da saturação. Aspectos como a finalidade do TC, critérios para sua especificação e dimensionamento, também são tratados no Capítulo 2.

No Capítulo 3, são descritos os métodos de detecção e compensação dos intervalos distorcidos na forma de onda dos sinais de corrente secundário, provenientes de transformadores de corrente com núcleo saturado.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos por cada metodologia para cada situação analisada, bem como a descrição do sistema teste e das condições de falta para cada simulação realizada.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho, considerando o desempenho das metodologias de acordo com a precisão na detecção e o tempo de resposta de cada método analisado.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE

2.1 Considerações Gerais

A proteção de sistemas elétricos de potência é feita pelos relés, que são sensores colocados estrategicamente no sistema para efetuar a proteção do mesmo. Os relés atuam isolando um defeito do resto do sistema, quando sensibilizados por uma perturbação, como um curto-circuito.

Os transformadores de corrente são destinados a alimentar os relés conectados em seus terminais secundários, fornecendo-lhes os sinais de corrente, que irão determinar sua atuação no sistema, promovendo a abertura do disjuntor, isolando assim o trecho defeituoso. Dessa forma, o fenômeno da saturação dos transformadores pode ocasionar a operação indevida ou não operação dos esquemas de proteção, em virtude das distorções ocorridas nos sinais de corrente.

O presente Capítulo vai abordar conceitos importantes sobre os TCs, como critérios para modelagem e especificação, além das causas que levam a saturação do núcleo, fenômeno que deve ser entendido para desenvolver as metodologias capazes de detectar e corrigir os intervalos distorcidos dos sinais de corrente secundária.

2.2 Modelagem do Transformador de Corrente

2.2.1 Transformador de Corrente (TC)

É um equipamento destinado a reproduzir proporcionalmente em seu secundário a corrente de seu circuito primário. Suas finalidades são (KINDERMANN, 1999):

- Isolar equipamentos de medição, controle e relés do circuito de alta tensão (AT);
- Fornecer no secundário uma corrente proporcional a do primário;

- Fornecer o nível de corrente adequado ao equipamento conectado ao terminal secundário do TC.

Pela norma NBR 6856 da ABNT, o TC deve fornecer no seu secundário uma corrente nominal de 5 A, com o objetivo de padronizar os equipamentos de medição e proteção (relés), que são ligados em série com a bobina secundária do TC. Já, a bobina primária deve ser ligada em série com o sistema de potência.

Além disso, a relação de transformação (RTC) de um TC é dada pela Equação 1.

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

Onde N_1 e N_2 representam, respectivamente, o número de espiras no primário e no secundário do TC.

A RTC também pode ser obtida pela razão entre a corrente nominal primária I_1 e a corrente nominal secundária I_2 do TC. Sendo esta normalizada em 5, a relação de transformação de um TC pode ser obtida conforme a Equação 2.

$$RTC = \frac{I_{1nom}}{5} \quad (2)$$

Segundo a ABNT, as correntes nominais primárias dos TCs podem ser de: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 30, 50, 60, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 1600, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000 e 8000 A (KINDERMANN, 1999). Já pela norma ANSI, essas correntes podem ser de: 10, 15, 25, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 1200, 3000, 4000 A (IEEE std C37 110-2007).

2.2.2 Circuito Equivalente do Transformador de Corrente

A Figura 1 mostra o circuito equivalente de um TC com uma carga ligada em seu secundário. Falhas em sistemas de potência causam transitórios, que modificam o comportamento dos TCs. Sendo assim, para se analisar as características dos TCs, as condições transitórias devem ser entendidas (IEEE std C37 110-2007). A nomenclatura utilizada na Figura 1 é mostrada na Tabela 1.

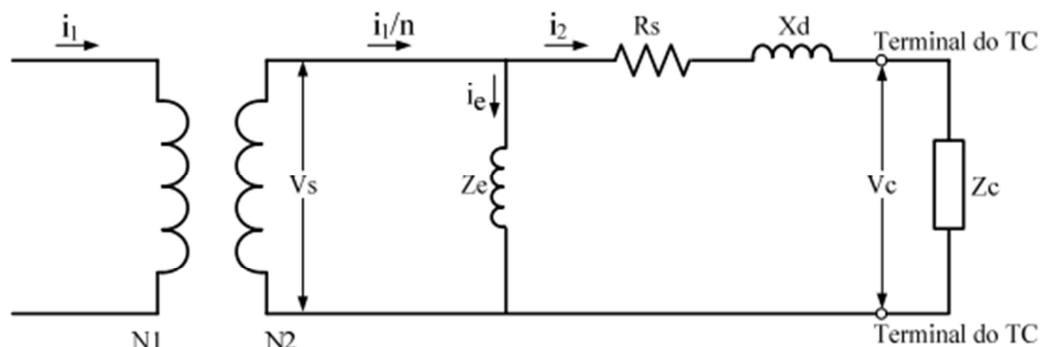


Figura 1 - Circuito equivalente simplificado de um TC e a sua carga conectada

FONTE: SANTOS (2011).

Tabela 1 – Símbolos do circuito equivalente

Símbolos			
V_S	Tensão secundária de excitação	V_C	Tensão na carga
i_1	Corrente Primária	Z_e	Impedância de excitação
$i_{1/n}$	Corrente Secundária Total	R_S	Resistância secundária
i_2	Corrente Secundária de carga	X_d	Reatância de dispersão
i_e	Corrente de excitação	Z_C	Impedância da carga
N_1/N_2	Relação de espiras		

O valor da corrente de excitação i_e é pequeno em condições normais de operação e o erro causado por essa corrente é desprezível, já que o TC está operando na região linear da curva de excitação do núcleo. Todavia, na ocorrência de um curto-circuito, por exemplo, o TC pode operar na região não linear da curva de excitação. Nessa região, a corrente de magnetização tem incrementos desproporcionais, causando erros significativos na transformação. Como consequência disto, a forma de onda da corrente secundária é distorcida, comprometendo a operação dos relés de proteção. A corrente de excitação é dada pela Equação 3, onde i_M é a corrente de magnetização e i_{loss} representa as perdas no núcleo.

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

2.2.3 Fator de Sobrecorrente do TC

O fator de sobrecorrente (FS) do TC é definido pela razão entre a máxima corrente de curto-circuito que pode passar pelo primário do TC e a sua corrente primária nominal, de forma que a precisão de sua classe de exatidão seja mantida. A equação que representa o FS é mostrada na Equação 4.

$$FS = \frac{I_{P\text{máximo curto-circuito}}}{I_{P\text{ nominal TC}}} \quad (4)$$

As precisões do transformador de corrente para proteção são 2,5%, 5% e 10%. Normalmente, para esta finalidade, são utilizados TCs com erro máximo de 10%.

O padrão ANSI estipula o valor do fator de sobrecorrente como 20. A ABNT estipula os valores de FS 5, 10, 15 ou 20.

Construtivamente o FS produz uma limitação no TC quanto ao seu erro produzido pela não linearidade da curva de magnetização do núcleo (Kinderman, 1999). Esta limitação ($I_{\text{curto-circuito}} \leq FS \cdot I_{P\text{nominal do TC}}$), é a garantia de que a transformação não excederá o erro máximo de exatidão do respectivo TC.

2.2.4 Curva Característica de Excitação Secundária do TC

Representa em escala logarítmica, a tensão secundária de excitação V_S que o TC entrega em função da corrente de excitação do núcleo i_e . As curvas de operação dos TCs podem ser obtidas a partir de testes realizados em campo e por cálculos no processo de fabricação. A Figura 2 representa um conjunto de curvas para um TC da classe C, sem divisões em seu núcleo.

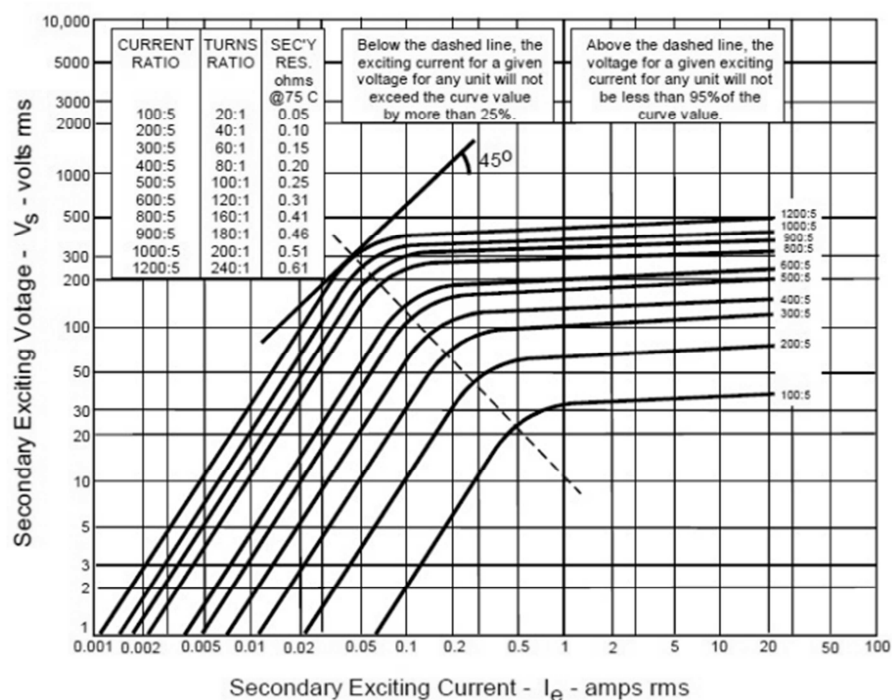


Figura 2 - Curva de excitação para TCs da classe C com diferentes tipos de relações de transformação.

FONTE: IEE std C37 110-2007.

Quando o TC esta operando em condições normais, a tensão entregue a carga é pequena, logo a corrente e o fluxo magnético no núcleo do TC operam com valores pequenos, dentro da região linear da curva de magnetização do núcleo (Kinderman, 1999). Nesse caso, a forma de onda do secundário não sofrerá nenhuma distorção apreciável.

À medida que a tensão secundária de excitação (V_s), do TC aumenta, devido a um incremento na corrente ou na carga do TC, o fluxo no núcleo também aumentará. Eventualmente, o TC poderá operar na região não linear, onde há um aumento desproporcional da corrente de excitação. Nessa região, o núcleo do TC encontra-se magneticamente saturado, causando elevado erro de transformação e, conseqüentemente, distorcendo a forma de corrente secundária (IEEE std C37 110-2007).

2.2.5 Tensão de Ponto de Joelho

O padrão ANSI define o ponto de joelho como o ponto da curva de excitação em que uma reta tangente faz um ângulo de 45° em relação ao eixo das abscissas. Essa definição é aplicada para TCs sem entreferro. Para TCs com entreferro, o referido ângulo deve ser de 30° .

O ponto do joelho também pode ser definido como o ponto em que um incremento de 10% na tensão de excitação provoca um aumento de 50% na corrente de excitação. Essa definição é dada pela norma IEC 60044-6.

O ponto de joelho é definido como o ponto de maior permeabilidade magnética do núcleo do TC (IEEE std C37 110-2007). O transformador de corrente irá reproduzir uma corrente secundária distorcida, quando operar acima das coordenadas desse ponto.

2.2.6 Classificação dos TCs quanto a Exatidão

2.2.6.1 Classe de Exatidão do TC pela ANSI

Em IEEE std C37 110-2007, a classe de exatidão do TC é definida como a máxima tensão que pode aparecer no seu secundário, quando conectado a uma carga padrão, para uma corrente primária de 20 vezes a corrente nominal, sem exceder 10% de erro na transformação.

Pelo padrão ANSI, a nomenclatura dos TCs conforme sua classe de exatidão é feita de acordo com a Expressão 5.

$$\left. \begin{matrix} \text{(C)} \\ \text{(K)} \\ \text{(T)} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 10 \\ 20 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 400 \\ 800 \end{matrix} \right\} \quad (5)$$

Onde as letras correspondem às classes dos TCs e indicam (SANTOS, 2011):

- C - Que o fluxo de dispersão é desprezível e a característica de excitação pode ser usada para determinar o desempenho do TC (erro pode ser calculado equivalente ao TC de baixa impedância da ABNT).
- K - Mesmo que a classe C, entretanto a tensão no ponto do joelho da curva de excitação deve ter no mínimo 70% da tensão nominal especificada na nomenclatura. Os transformadores dessa classe possuem núcleos maiores que da classe C (IEE std C37 110-2007).
- T - Nessa classe, os TCs apresentam erros de transformação significativos por apresentarem um alto fluxo de dispersão no núcleo, o que ocorre em consequência do primário enrolado. O erro deve ser obtido a partir de teste.

Pelo antigo padrão ANSI, a nomenclatura era dada pelo valor do erro, seguida por uma letra que representa se o TC é de alta reatância (H) ou de baixa reatância (L) e por um valor indicando a classe de tensão secundária. Essa nomenclatura é dada conforme a Expressão 6.

$$\left. \begin{matrix} \{2,5\} \\ \{10\} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \text{(L)} \\ \text{(H)} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 10 \\ 20 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 400 \\ 800 \end{matrix} \right\} \quad (6)$$

2.2.6.2 Classe de Exatidão do TC pela ABNT

É definida com base na máxima potência aparente (VA) consumida pela carga conectada no secundário, para uma corrente nominal de 5A (KINDERMANN, 1999). Essa nomenclatura é dada conforme a Expressão 7.

$$\left. \begin{matrix} \{A\} \\ \{B\} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} \{2,5\} \\ \{10\} \end{matrix} \right\} F \left. \begin{matrix} \{5\} \\ \{10\} \\ \{15\} \\ \{20\} \end{matrix} \right\} C \left. \begin{matrix} \{12,5\} \\ \{25\} \\ \{50\} \\ \{100\} \\ \{200\} \\ \{400\} \\ \{800\} \end{matrix} \right\} \quad (7)$$

Onde o primeiro termo indica se o TC é de alta (A) ou baixa (B) reatância. O segundo indica o erro admissível da sua classe de exatidão em porcentagem. A letra “F” refere-se a Fator de Sobrecorrente e o termo seguinte indica seu valor. A letra “C” refere-se à carga no secundário e o número seguinte indica o valor em VA da potência aparente no secundário para uma corrente nominal de 5A (SANTOS, 2011).

2.2.7 Cargas Padrões para TCs de Proteção

Os relés são os principais elementos da proteção. Representam uma carga considerável no carregamento do TC. Os valores de carga padrão para TCs de proteção são listados na Tabela 2. A tensão no terminal secundário do TC relacionada com as cargas padrão é mostrada na Tabela 3, onde os valores de tensão são para correntes iguais a 20 vezes a corrente nominal, sem exceder o erro máximo admissível.

Tabela 2 - Cargas padrão para TCs de proteção

Carga	Designação da Carga	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Impedância (Ω)	VA (para5A)	Fator de Potência
TCs 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

Tabela 3 - Tensão secundária relacionada com as cargas padrão para os TCs de proteção

Tensão no Terminal Secundário	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

2.2.8 Principais Tipos Construtivos de TCs

Os principais tipos de transformadores de corrente podem ser classificados de acordo com suas construções mecânicas (IEE std C37 110-2007), como mostrado a seguir:

- *Tipo Primário Enrolado:* TC que possui o enrolamento primário constituído de uma ou mais espiras envolvendo mecanicamente o núcleo do transformador, ilustrado na Figura 3. Onde as espiras primárias e secundárias são isoladas eletricamente. Normalmente, esse tipo de TC é usado para serviço de medição, mas pode ser usado também para serviço de proteção, onde pequenas relações são requeridas.

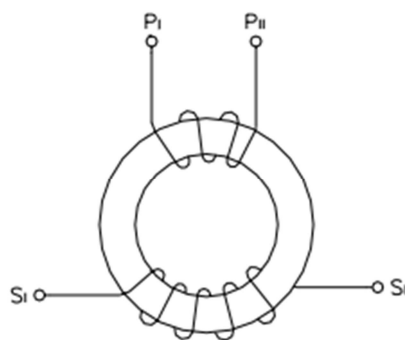


Figura 3 - TC tipo primário enrolado
FONTE: DUAIBIL (1999).

- *Tipo Janela:* Este tipo de TC não possui enrolamento primário próprio como parte integrante da estrutura. É constituído de uma abertura através do núcleo, por onde passa um condutor utilizado como enrolamento primário. O enrolamento secundário é isolado e acoplado no núcleo. O ar é utilizado é o meio isolante entre o condutor do primário e a estrutura do TC. Esse tipo de TC esta ilustrado na Figura 4.

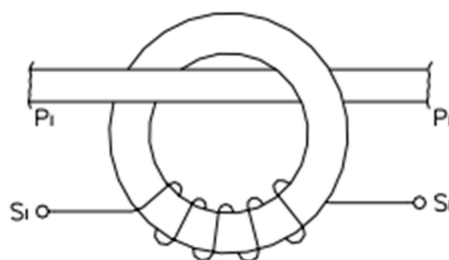


Figura 4 - TC tipo janela
FONTE: DUAIBIL (1999).

- *Tipo Bucha:* É um tipo especial de TC tipo janela, construído e projetado para se instalado sobre uma bucha de um equipamento elétrico. Para correntes baixas esses TCs são menos precisos, por apresentarem maior corrente de excitação. Esse tipo de TC esta ilustrado na Figura 5.

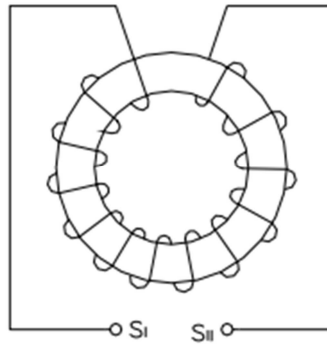


Figura 5 - TC tipo bucha
FONTE: DUAILIB (1999).

2.3 Dimensionamento do TC quanto a sua Relação de Transformação

Dois critérios devem ser levados em consideração para o cálculo da relação de transformação, sendo que ambos devem ser satisfeitos. O primeiro critério é determinado pela corrente de carga do alimentador e o segundo considera o fator de sobrecorrente.

2.3.1 Critério da Corrente de Carga Nominal do Alimentador

A relação de transformação deve ser escolhida de forma a garantir que a corrente primária cubra a corrente nominal de carga do alimentador, conforme a Expressão 8. Vale ressaltar que esse critério leva em consideração apenas o comportamento em regime permanente, não devendo ser adotado isoladamente, mas sim em conjunto com o critério do curto-circuito.

$$I_{1TC} > I_{\text{nom do alimentador}} \quad (8)$$

2.3.2 Critério do Curto-Circuito

A corrente primária nominal do TC deve ser maior ou igual à máxima corrente de curto-circuito no local de instalação do TC, limitada pelo seu Fator de Sobrecorrente (FS), conforme a Expressão 9.

$$I_{1TC} \geq \frac{I_{cc \max}}{FS} \quad (9)$$

2.4 Saturação dos TCs

Em condições normais os transformadores de corrente reproduzem de maneira fiel as formas de onda das correntes do circuito primário, sem danificar os equipamentos de proteção conectados ao secundário do transformador de corrente. Contudo, quando o núcleo do TC torna-se saturado, a forma de onda aparece distorcida no terminal secundário do transformador de corrente. As principais causas que levam a saturação do núcleo são o fluxo remanescente antes da falta e as componentes unidirecionais (exponenciais) das correntes de curto-circuito (IEEE std C37 110-2007). Outros fatores que influenciam são a elevada carga (Burden) no secundário do TC e o mau dimensionamento do mesmo.

A Figura 6 ilustra o circuito simplificado de um TC, onde a corrente secundária total é representada por $(i_{1/n})$, ou seja, a corrente primária referida ao secundário, i_e é a corrente de excitação, i_2 a corrente que alimenta a carga (R). A impedância do ramo de magnetização Z_m é dada por X_m e R_m , que representam, respectivamente, a reatância e a resistência do ramo de magnetização.

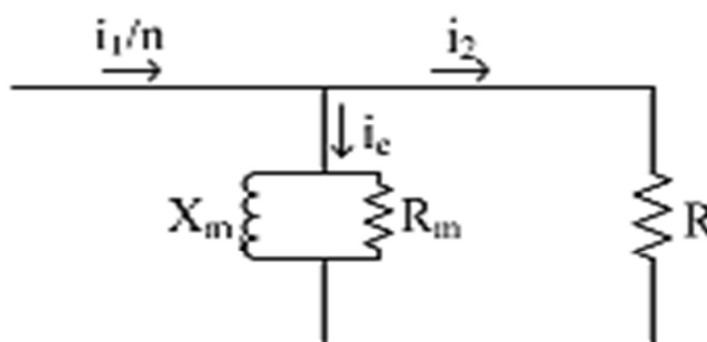


Figura 6 - Circuito simplificado do TC.

FONTE: SANTOS (2011).

Em condições normais de operação o valor da corrente de excitação é pequeno, pois o ramo de magnetização possui um alto valor de impedância. Desta forma, o erro causado pela corrente de excitação i_e é irrelevante e o transformador de corrente opera dentro da sua classe de exatidão. Porém, quando ocorre a saturação do núcleo do transformador a impedância do ramo de magnetização cai rapidamente e a maior parte da corrente ($i_{1/n}$) passa pelo ramo de magnetização, causando distorções significativas na forma de onda recebida pelas cargas conectadas ao secundário do TC, conforme mostrado na Figura 7.

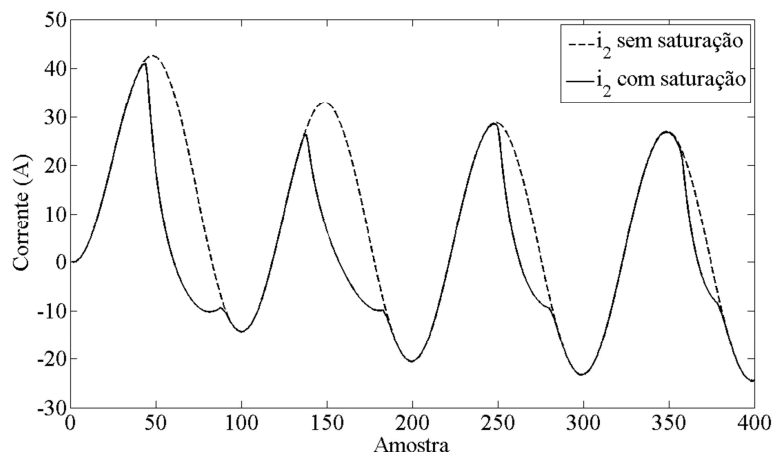


Figura 7 - Formas de onda da corrente secundária para um TC saturado e não saturado.
FONTE: SANTOS (2011).

2.4.1 Características Dinâmicas

2.4.2.1 Variação do Fluxo com Corrente Primária Assimétrica

A assimetria das correntes de curto-circuito provoca uma elevação desproporcional de fluxo magnético, podendo levar o TC saturação mais rapidamente.

A Figura 8 mostra o fluxo resultante para uma corrente primária simétrica. Nessa figura, o núcleo do TC não satura e a forma de onda da corrente secundária é mantida, sem exceder o erro máximo admissível da classe de exatidão do transformador.

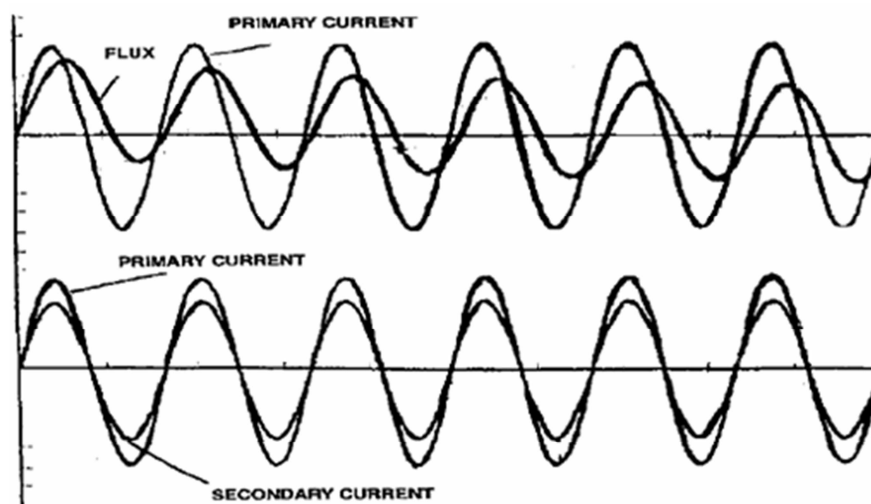


Figura 8 - Comportamento do fluxo para corrente simétrica
FONTE: IEEE Std C37 110-2007.

Entretanto, quando a corrente primária é assimétrica, o núcleo do TC pode saturar e o comportamento do fluxo se assemelha ao representado na Figura 9, que também apresenta a corrente secundária distorcida em virtude da saturação do núcleo do TC.

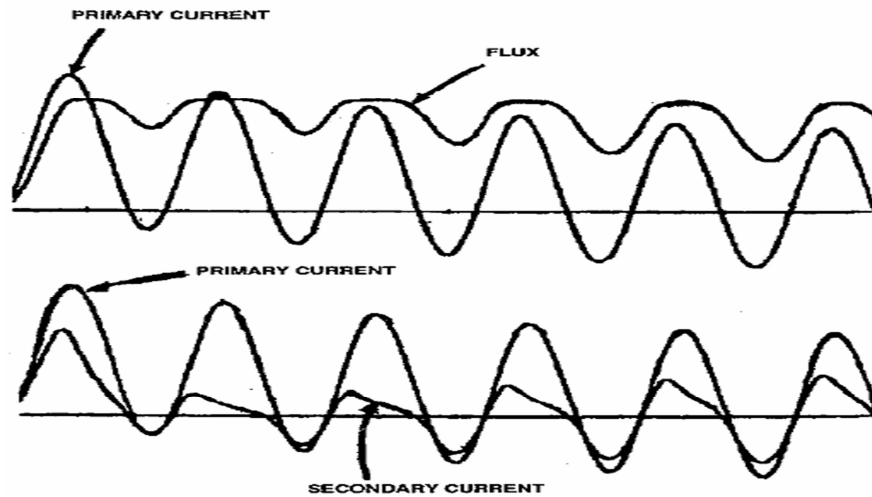


Figura 9 - Comportamento do fluxo para corrente assimétrica

FONTE: IEEE Std C37 110-2007.

2.4.2.2 Tensão de Saturação V_X

Por definição, é a tensão simétrica no enrolamento secundário para a qual o pico de indução excede a densidade de fluxo de saturação (IEEE std C37 110-2007). O ponto V_X é determinado graficamente pelo prolongamento das partes retas da curva de excitação do núcleo.

2.4.2.3 Critérios para evitar a saturação

Segundo SANTOS (2011), os efeitos da saturação podem ser evitados pelo dimensionamento da carga do TC e da tensão do ponto de joelho com valor acima da tensão requerida para uma falta máxima. Esses critérios devem ser observados considerando a possibilidade da existência de fluxo remanescente no núcleo e de componentes unidirecionais nas correntes de curto-circuito.

Além disso, a tensão do ponto de joelho deve variar entre 50% e 70% do valor padrão da tensão para a respectiva classe de exatidão do TC.

A observação de todos esses critérios pode resultar em TCs com núcleos muito grandes, inviabilizando seu uso. Sendo assim, medidas compensadoras devem ser

adotadas para minimizar os efeitos da saturação sobre os relés de proteção (IEEE Std C37 110-2007).

2.4.2.4 Causas da saturação

De acordo com a IEEE std C37 110-2007, os TCs podem reproduzir precisamente as correntes assimétricas de curto-circuito por até dois ciclos antes de entrarem na região saturada. Esse mesmo guia lista os seguintes fatores como determinantes para a saturação do TC:

A) *Grau de assimetria da corrente de falta*: Quanto maior a assimetria da corrente de falta, menor o tempo até a saturação.

B) *Magnitude da corrente de falta*: Quanto maior for a magnitude da corrente de falta, maior será o incremento no fluxo e conseqüentemente, menor é o tempo para a saturação do núcleo do TC.

C) *Fluxo remanescente no núcleo do TC*: O fluxo remanescente do núcleo do transformador, irá se somar ou subtrair com o fluxo gerado pela corrente primária de falta, dependendo de sua polaridade. Caso ocorra uma soma entre fluxos, o TC irá saturar mais rapidamente.

D) *Impedância do circuito secundário*: Quanto maior for a carga conectada no secundário do TC, mais curto será o tempo até a saturação, porque cargas elevadas exigem maiores tensões e o fluxo é proporcional à tensão. Para duas impedâncias de mesma magnitude, a que tiver maior parcela indutiva (fator de potência inferior) saturará de forma mais lenta do que para cargas puramente resistivas. Isso acontece porque a indutância representa baixa impedância para as componentes contínuas das correntes assimétricas, reduzindo a tensão na carga e o fluxo associado.

E) *Tensão de saturação*: Quanto maior for a seção transversal do núcleo de um TC, maior será o fluxo exigido para o TC saturar. Dessa forma, ocorre um aumento da tensão de saturação e, conseqüentemente, maior tempo até a saturação.

F) *Razão de espiras*: Aumentando a razão de espiras secundárias a quantidade de fluxo necessário para produzir uma determinada força eletromotriz secundária será pequena e o TC irá saturar para tensões mais altas. Entretanto, um aumento no número de espiras reduz a corrente no secundário para uma determinada corrente primária, reduzindo o fluxo no núcleo.

2.4.2 Efeitos do Fluxo Remanescente

Uma vez estabelecido no núcleo do TC, o fluxo remanescente é lentamente dissipado. Uma tensão equivalente a 60% da tensão do ponto de joelho deve ser aplicada para reduzir o fluxo remanescente em menos de 10% da densidade de fluxo de saturação. O fluxo remanescente permanecerá no núcleo até que este seja desmagnetizado (SANTOS, 2011).

Algumas formas de controlar o fluxo remanescente estão descritas em IEEE std C37 110-2007, conforme a seguir:

- *Núcleos com duas magnetizações*: Uma seção do núcleo é magnetizada com 75% da máxima densidade de fluxo e polaridade positiva (com a utilização de uma fonte CC), enquanto a outra seção é magnetizada com polaridade negativa, de forma a anular a remanescência no núcleo do TC.
- *Diferentes quantidades de aço no núcleo*: Núcleos laminados a quente possuem diferente permeabilidade magnética e reduzem o fluxo remanescente em até a metade do valor, em relação aos núcleos laminados a frio.
- *Núcleos com entreferro*: Núcleos com entreferro reduzem o fluxo remanescente a valores muito pequenos, mas aumentam a corrente de magnetização.

2.4.3 Efeitos da Saturação Sobre os Principais Tipos de Proteção

A saturação dos TCs pode ocasionar a não operação ou operação indevida dos relés de proteção.

Os efeitos da saturação sobre os principais tipos de proteção são discutidos a seguir.

2.4.4.1 Efeitos da Saturação em Relés de Distância

De acordo com MONNEY (2008), os relés de distância podem apresentar problemas de subalcançe e atrasos na operação. Esses problemas ocorrem devido à redução da magnitude e defasagem da corrente, que causam aumento na impedância vista pelos relés.

2.4.4.2 Efeitos da Saturação em Relés Diferenciais

Devido o surgimento de correntes diferenciais fictícias durante a saturação do TC, o relé diferencial pode operar indevidamente para faltas externas (DASHTI et al., 2007).

2.4.4.3 Efeitos da Saturação em Relés de Sobrecorrente

Relés temporizados podem apresentar atrasos significativos em sua operação devido à saturação do TC, dependendo da severidade dessa saturação, que está relacionada ao nível de corrente de curto-circuito, à constante X/R do sistema, à carga do TC e ao fluxo remanescente no núcleo (SANTOS 2011).

2.5 Considerações Finais

Neste Capítulo, foram apresentados fundamentos básicos dos transformadores de corrente e o fenômeno da saturação dos TCs, com intuito de prover melhor entendimento sobre esse fenômeno.

Como a saturação dos TCs pode implicar na operação indevida ou na não operação dos relés de proteção, evidencia-se a necessidade da utilização de metodologias para a detecção e correção desse fenômeno.

Sendo assim, o Capítulo seguinte apresenta três metodologias de detecção e uma de compensação dos intervalos em que a forma de onda da corrente secundária encontra-se distorcida, em função da saturação dos transformadores de corrente.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE DETECÇÃO E COMPENSAÇÃO DOS INTERVALOS DISTORCIDOS PELA SATURAÇÃO

3.1 Considerações Gerais

Após a saturação do núcleo do transformador de corrente, as correntes do secundário não são mais replicadas fielmente. Isso pode causar a operação indevida ou até a não operação dos relés de proteção, uma vez que os sinais de corrente provenientes de TCs saturados podem ser processados de maneira inadequada pelos dispositivos alimentados por esses transformadores.

Existem normas que estipulam soluções para reduzir o impacto da saturação dos TCs, porém nem sempre são eficientes. Entretanto, o desenvolvimento de metodologias, que utilizam ferramentas matemáticas e computacionais, pode ser uma boa alternativa para garantir que os relés de proteção operem adequadamente durante o intervalo em que o transformador de corrente está saturado. Essas técnicas pra detecção e compensação dos efeitos da saturação, a serem utilizadas em relés microprocessados, torna os esquemas de proteção mais confiáveis, reduzindo e minimizando (KINDERMANN, 1999):

- A extensão do defeito no equipamento reduzindo o custo da reparação;
- A probabilidade de que o defeito possa se propagar e envolver outros equipamentos;
- O tempo em que o equipamento fica disponível;
- A perda da produção;
- E descontentamento público.

O presente Capítulo descreve três metodologias de detecção e uma metodologia de compensação para a correção dos intervalos distorcidos que ocorrem em função da saturação do núcleo dos transformadores de corrente.

3.2 Metodologias de Detecção

Para uma correção adequada do sinal distorcido é necessário uma detecção precisa do intervalo de saturação. A metodologia de compensação é totalmente dependente da detecção desses intervalos, uma vez que podem adicionar erros desnecessários ao sinal de corrigido, quando os trechos distorcidos por saturação forem detectados erroneamente.

A seguir esta descrita às três metodologias de detecção utilizadas, mais a metodologia de compensação dos sinais distorcidos.

3.2.1 Detecção da Saturação a Partir das Funções Diferença do Sinal Analisado

Esse método de detecção dos intervalos de saturação foi proposto por KANG et al. (2004), onde é fundamentado na análise das funções-diferença do sinal de corrente secundária. Os autores propõem o uso de três funções-diferença: a primeira, segunda e terceira função-diferença são dadas conforme (14), (15) e (16), respectivamente.

$$\text{del}_1(n) = i_2(n) - i_2(n - 1) \quad (14)$$

$$\text{del}_2(n) = \text{del}_1(n) - \text{del}_1(n - 1) \quad (15)$$

$$\text{del}_3(n) = \text{del}_2(n) - \text{del}_2(n - 1) \quad (16)$$

Onde n representa a amostra atual do sinal de corrente secundária (i_2), a qual as funções-diferença estão associadas.

Como os valores das funções-diferença apresentam incrementos significativos no início e no fim dos intervalos de saturação, essas variações são utilizadas para detecção dos trechos distorcidos do sinal de corrente analisado.

A condição definida pelos autores para a detecção da saturação esta expressa em (17), onde o valor de ajuste Th representa o maior valor para qual o transformador de corrente esta livre de saturação, sendo determinado pela equação (18).

$$|\text{del}_3| > Th \quad (17)$$

Os autores da proposta sugerem o uso da terceira função-diferença (del_3) para a detecção da saturação, já que essa função apresenta incrementos significativos exatamente nos pontos de início e fim da saturação, tornando a detecção mais precisa.

$$Th = K\sqrt{2}I_{fmax} \left[2 \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \right]^3 \quad (18)$$

Em (18), K é o ajuste da sensibilidade do algoritmo, I_{fmax} é a máxima corrente de curto-circuito e N é a taxa de amostragem por ciclo.

O método de detecção pode ser visualizado na Figura 10, onde é possível verificar que, nos pontos de início e fim da saturação, os valores das funções-diferença sofrem incrementos significativos. Quando determinado o início do intervalo saturado o detector tem valor igual a um, permanecendo nesse estado até encontrar o final do intervalo distorcido. Para intervalos sem saturação, o estado do detector é igual a zero.

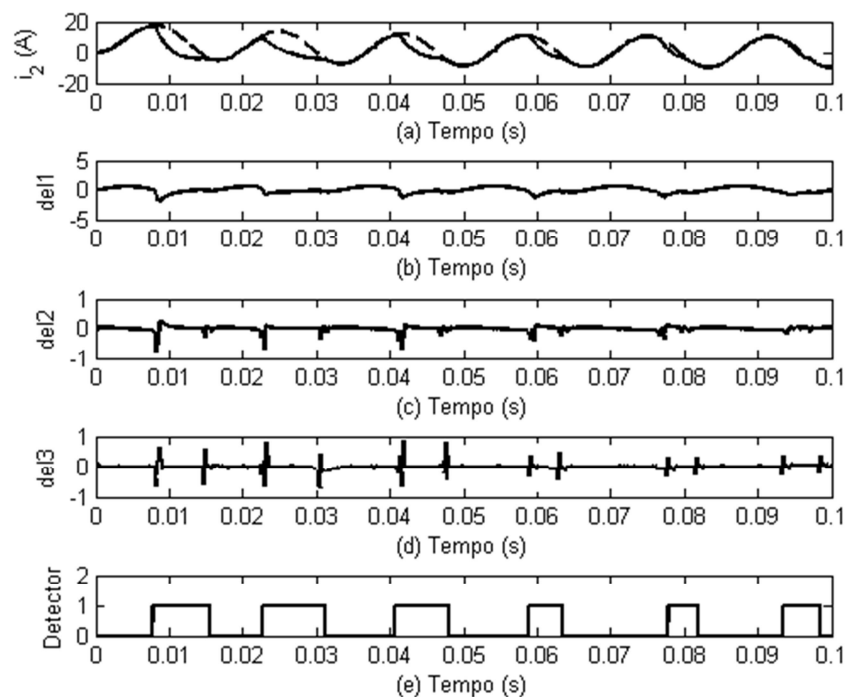


Figura 10 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Primeira função diferença (del1). (c) Segunda função diferença (del2). (d) Terceira função diferença (del3). (e) Detector de saturação.

3.2.2 Detecção da Saturação Através da Terceira Derivada

WISZNIEWSKI et al. (2008) propuseram uma metodologia de detecção, fundamentada na estimação de pontos futuros, utilizando a terceira derivada do sinal, de acordo com (19), em que n é o valor da amostra a ser estimada.

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

A cada ponto estimado é verificada a condição que determina o início do intervalo saturado, conforme (20). A condição de início é atingida quando o valor da diferença entre o ponto estimado e a amostra atual exceder um valor limite para o erro da estimação.

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

Onde ε_{Th} é o valor limite para o erro da estimativa. Os autores da proposta não forneceram um critério para obtenção do valor de ε_{Th} . Entretanto, esse valor foi obtido empiricamente, após a análise de diversos casos, e fixado em 0.04, valor que apresentou melhores resultados na detecção dos intervalos distorcidos por saturação.

A Figura 11 exemplifica o processo de detecção do início do intervalo de saturação.

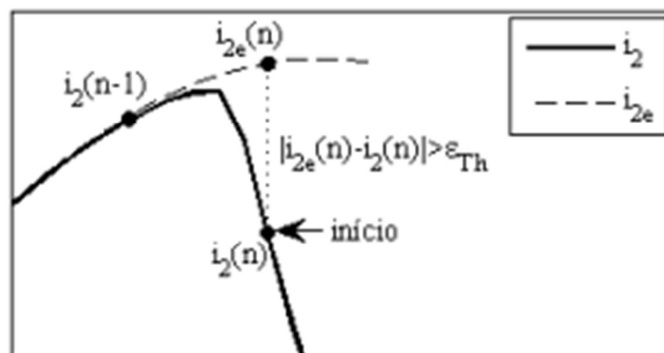


Figura 11- Detecção do início do intervalo de saturação

FONTE: SANTOS (2011).

Depois de detectado o início da saturação, é verificada a condição de detecção do final da saturação, que se dá conforme a Expressão (21). Quando detectado o início da saturação o detector muda de zero para um e permanece nesse estado enquanto a condição descrita em (21) for satisfeita. Quando essa condição não for mais satisfeita, fica caracterizado o final do intervalo distorcido e o detector muda seu estado de um para zero.

$$\begin{aligned} & \text{sign} \left[\frac{i_2(n-1)}{8} + \frac{i_{2e}(n)}{8} + \frac{3 \cdot i_{2e}(n)}{4} + i_2(n+1) + \dots + i_2(n+k) \right] \\ & = \text{sign} \left[\frac{i_2(n-1)}{8} + \frac{i_{2e}(n)}{8} + \frac{3 \cdot i_{2e}(n)}{4} + i_2(n+1) + \dots + i_2(n+k) + i_2(n+k+1) \right] \quad (21) \end{aligned}$$

O valor de ε_{Th} foi escolhido de forma a promover maior precisão ao processo de detecção e pode variar conforme o número de amostragem do sistema. No estudo, esse valor foi ajustado em 0.04 para uma amostragem de 96 amostras por ciclo. O mesmo método também foi testado para 16, 32 e 64 amostras por ciclo, onde diferentes valores foram ajustados. A Figura 12 exemplifica o funcionamento da metodologia.

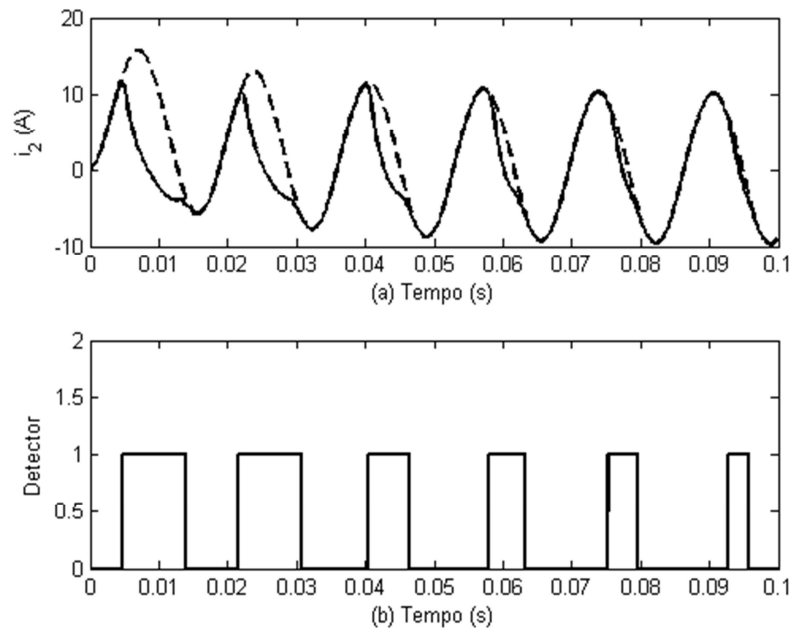


Figura 12 - Detecção dos intervalos de saturação através da Terceira Derivada. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e distorcida. (b) Detector de saturação.

3.2.3 Detecção da Saturação Através da Morfologia Matemática

Esse método de detecção foi proposto em LU et al. (2008). Fundamenta-se na estimação de pontos futuros, utilizando operadores da Morfologia Matemática.

Nessa técnica, uma janela móvel com um número ímpar de amostras é utilizada, a qual é analisada em função do termo central. Essa janela é então dividida em dois conjuntos: um conjunto de amostras pares ($X_P[n]$) e um conjunto de amostras ímpares ($X_I[n]$). A janela de dados e os conjuntos de amostras pares e ímpares são representados respectivamente, pelas Expressões (22), (23) e (24).

$$X[n] = [X_0, X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6] \quad (22)$$

$$X_P[n] = [X_0, X_2, X_4, X_6] \quad (23)$$

$$X_I[n] = [X_1, X_3, X_5] \quad (24)$$

A janela móvel de dados é representada pelo conjunto $X[n]$. Além disso, o termo central da janela de dados é representado nos conjuntos por X_3 e a amostra atual é representada pelo termo X_6 .

Para estimação de pontos futuros do sinal, primeiramente, deve-se conhecer as características do sinal em questão. Na morfologia matemática, essas características são guardadas em um elemento estruturante (SE), conforme (25). Como, os sinais de corrente dos sistemas de potência são essencialmente senoidais, as SEs apresentam características senoidais, tal como o sinal de corrente secundária a ser analisado. Como as senóides e cossenóides são simétricas, a SE também é simétrica.

$$K_m = [\cos(2m - 1)\varphi, \dots, \cos \varphi, \cos \varphi, \dots, \cos(2m - 1)\varphi] \quad (25)$$

A SE é representada por termos contados a partir do eixo de simetria. A posição de cada termo no conjunto é representada por $V = 1, \dots, m$, tanto para esquerda como para a direita, onde m é um número inteiro positivo. O comprimento da SE (K_m) é igual a $2m$.

Após determinar a SE, são obtidos os operadores morfológicos Dilatação e Erosão, conforme (26) e (27), respectivamente. Esses operadores são calculados para o conjunto de amostras pares. Para o cálculo da Dilatação são usados os termos da esquerda da SE e, no cálculo da Erosão, são usados os termos da direita da SE.

$$(X \oplus K_m) = \max_{n-v \in DX, v \in DK_m} \left\{ \frac{X(n-v)}{K_m(v)} \right\} \quad (26)$$

$$(X \ominus K_m) = \max_{n-v \in DX, v \in DK_m} \left\{ \frac{X(n-v)}{K_m(v)} \right\} \quad (27)$$

Onde, n é a posição da amostra central da janela de dados (X_3), $n-v$ a posição dos termos a esquerda do termo central (X_0 ou X_2 , no conjunto de amostras pares) e $n + v$ a posição dos termos a direita do termo central (X_4 ou X_6 , no conjunto de amostras pares).

O operador morfológico para a estimação (P) é a média entre os operadores Dilatação e Erosão, calculados para o conjunto de amostras pares para cada SE. Esse operador é utilizado na detecção do sinal saturado, dado de acordo com a Expressão (28).

$$P(X_e) = \frac{1}{2D} \sum_{i=1}^D (X_e \oplus K_i + X_e \ominus K_i) \quad (28)$$

Na Expressão (28), K_i representa a SE com comprimento $2i (i=1, \dots, D)$. Quando i é igual a D , o número de amostras pares usada na estimação é igual a $2D$, onde D é o número de termos a esquerda e a direita da amostra central da janela de dados.

O detalhe do sinal é determinado conforme (29) e é obtido a partir da diferença entre o valor central da janela de dados e o valor estimado para o conjunto de amostras pares.

$$d[n] = X_0[n] - P(X_e[n]) \quad (29)$$

A partir do detalhe do sinal é aplicada a condição de detecção do início e fim do trecho saturado. O valor de ajuste para essa condição não foi dada pelo autor, sendo ajustada de forma a prover maior precisão ao processo de detecção, conforme (30).

$$|d(n)| > 0.02 \quad (30)$$

Esse valor foi obtido empiricamente, através da análise de diversos casos, e foi escolhido por apresentar melhores resultados durante o processo de detecção dos intervalos distorcidos por saturação.

Na Figura 13 pode ser observado o processo de detecção dos intervalos distorcidos. O sinal do detalhe é bem próximo de zero nos intervalos sem distorção. No entanto, nos pontos correspondentes ao início e fim dos trechos distorcidos, o sinal de detalhe sofre incrementos significativos, possibilitando uma boa detecção dos trechos distorcidos da forma de onda do sinal de corrente secundária.

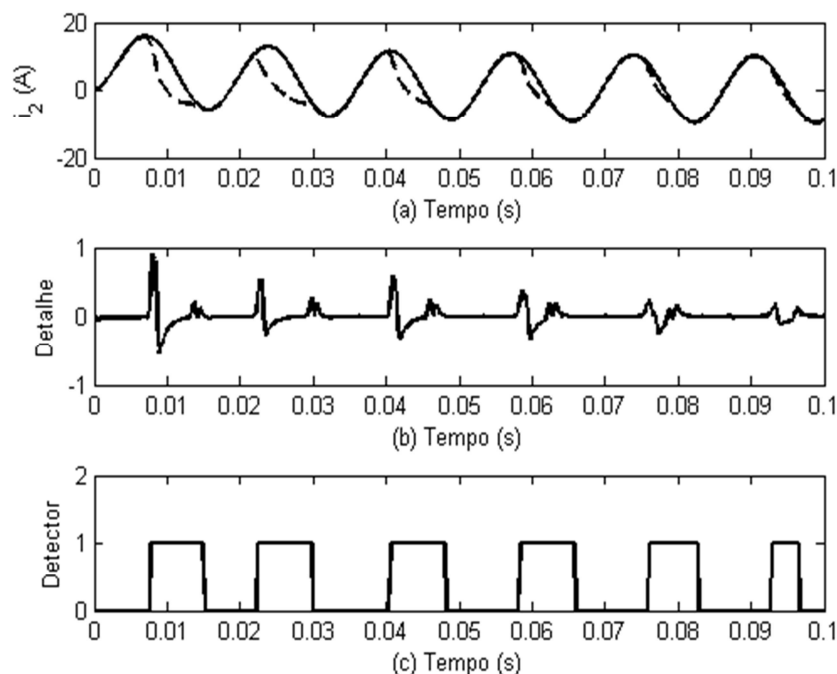


Figura 13 - Detecção dos intervalos de saturação através da Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.

A condição foi ajustada em 0.02 para uma amostragem de 96 amostras por ciclo. O mesmo método também foi testado para 16, 32 e 64 amostras por ciclo, onde diferentes valores foram ajustados. Foram utilizadas duas SEs, K_1 e K_2 , e a janela de dados foi ajustada em sete amostras, sendo, quatro amostras pares e três amostras ímpares.

3.3 Metodologia de Compensação

Em PAN et al. (2004) foi proposta uma metodologia para compensação dos efeitos causados pela saturação dos TCs, que é baseada na técnica de Ajuste de Curvas por Mínimos Quadrados.

A compensação da corrente distorcida é feita utilizando a equação que descreve o comportamento da corrente de curto-circuito, sendo esta representada por uma componente senoidal de regime permanente, determinada pela tensão e a impedância do sistema, e uma componente exponencial, que será amortecida pela constante de tempo X/R do sistema. Essa é equação é dada conforme (31).

$$I_k = A \cos \left(2\pi k \frac{f}{f_{\text{amostra}}} + \varphi \right) + B e^{\lambda k} \quad (31)$$

Onde, k representa a amostra a ser compensada, f_{amostra} é a frequência de amostragem e f é a frequência do sistema. A , B , φ , λ são as características que definem a forma de onda da corrente de falta, a serem utilizadas na compensação dos trechos distorcidos do sinal.

De acordo com os autores, as características da corrente de falta podem ser estimadas pelo Método de Ajuste de Curvas por Mínimos Quadrados, somente com amostras pertencentes aos trechos não distorcidos do sinal.

A Equação (31) pode ser reescrita pela expansão do termo cosseno para a componente de regime permanente e pela aproximação de primeira ordem da Série de Taylor para a função exponencial, de acordo com a Equação (32).

$$I_k = (A \cos \varphi) \cos \omega k + (-A \sin \varphi) \sin \omega k + B + \lambda k \quad (32)$$

Reescrevendo a equação (32), fazendo $C_1 = A \cos \varphi$ e $C_2 = -A \sin \varphi$, obtém-se a Equação (33).

$$I_k = C_1 \cos \omega k + C_2 \sin \omega k + B + \lambda k \quad (33)$$

Onde, ω é a frequência angular dada por $2\pi f / f_{\text{amostra}}$.

A matriz expressa em (34) é formada por amostras retiradas de dois trechos não saturados consecutivos, sendo estes, respectivamente, anteriores e posteriores a um intervalo de saturação previamente detectado. Dessa forma, as amostras do primeiro intervalo não distorcido da forma de onda, utilizada nos cálculos, são numeradas de k_i até $k_i + m_i$ e as amostras do segundo intervalo sem saturação são numeradas de k_j até $k_j + m_j$.

$$\begin{bmatrix} \cos \omega(k_i) & \cos \omega(k_i) & k_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \omega(k_i + m_i) & \sin \omega(k_i + m_i) & k_i + m_i & 1 \\ \cos \omega(k_j) & \cos \omega(k_j) & k_j & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \omega(k_j + m_j) & \sin \omega(k_j + m_j) & k_j + m_j & 1 \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \lambda \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(k_i + m_i) \\ \vdots \\ I(k_i + m_i) \\ I(k_j) \\ \vdots \\ I(k_j + m_j) \end{bmatrix} \quad (34)$$

As matrizes acima podem ser representadas de acordo com (35), em que M é a matriz de senos e cossenos, P , o vetor com os valores desconhecidos e I , o vetor com os valores das amostras de corrente dos respectivos trechos não distorcidos.

$$MP = I \quad (35)$$

A obtenção do vetor P é dada pela Expressão (36), onde $(M^T M)^{-1} M^T$ é a pseudo-inversa da matriz M .

$$P = (M^T M)^{-1} M^T I \quad (36)$$

Após a obtenção dos parâmetros C_1 , C_2 , λ e B , é possível compensar a forma de onda distorcida durante os intervalos de saturação, substituindo esses valores na Equação (33).

Esse método foi testado para 96 amostras/ciclo, usando dez pontos anteriores e cinco amostras posteriores a cada intervalo distorcido, preenchendo-se assim a matriz e o vetor de corrente descritos em (34), a serem utilizados para obtenção dos parâmetros desconhecidos C_1 , C_2 , λ e B .

3.4 Considerações Finais

Ao longo dos anos, foram sugeridas diversas metodologias para a detecção e compensação dos intervalos distorcidos em virtude da saturação dos TCs. Algumas destas foram discutidas no presente Capítulo.

Os resultados obtidos para a combinação entre cada técnica de detecção descrita neste Capítulo com a técnica de compensação por Mínimos Quadrados são mostrados no Capítulo seguinte.

Além disso, vale ressaltar que todas as metodologias foram analisadas para uma taxa de amostragem equivalente a 96 amostras por ciclo. Essa amostragem foi escolhida para testar o desempenho dos métodos quando associados à amostradores modernos de alta taxa de aquisição de dados e também por prover melhor desempenho as metodologias de detecção estudadas.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 Considerações Iniciais

Nesse Capítulo, são realizados testes envolvendo as metodologias descritas no Capítulo 3. Primeiramente, foi usado como sistema teste uma linha de transmissão com duas fontes, onde foram realizados os testes de curto-circuito para a obtenção dos sinais de corrente, que foram posteriormente usados nos testes das metodologias.

Após as simulações de curto-circuito, os métodos testados e os respectivos resultados podem ser vistos nesse Capítulo. A partir desses testes, torna-se possível a melhor compreensão sobre o funcionamento de cada método implementado, possibilitando uma análise qualitativa, de modo a destacar as vantagens e desvantagens de cada técnica analisada.

4.2 Sistema Teste

Para a implementação dos métodos de detecção e compensação dos intervalos distorcidos, foram analisados sinais de corrente secundária. Esses sinais foram obtidos através do software EMTP-ATP (Alternative Transients Program), a partir da simulação de uma linha de transmissão de alta tensão, de acordo com a Figura 14.

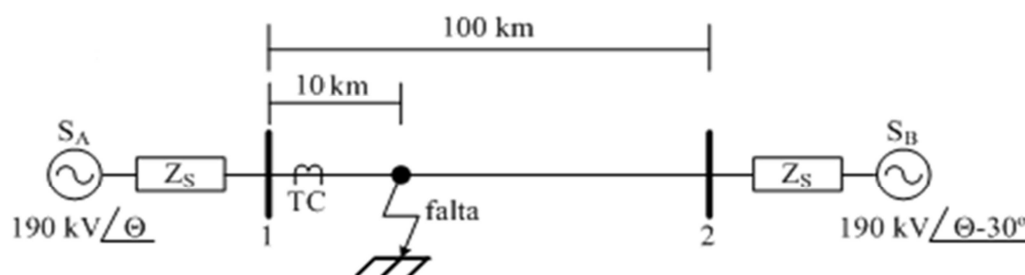


Figura 14 - Sistema teste.

O modelo da linha de transmissão simulada e os valores dos parâmetros são retirados de acordo com a publicação de SANTOS (2011). A frequência do sistema de potência é 60 Hz, com dois geradores (S_A e S_B) de 190 KV, defasados em 30° , com impedâncias de sequência zero e sequência positiva iguais, cujos valores são respectivamente, $Z_{S0}=3,681+j24,515 \Omega/\text{km}$ e $Z_{S1}=0,819+j7,757 \Omega/\text{km}$. A linha tem comprimento de 100 km, impedância de sequência zero $Z_{L0}=0,1841+j1,2258 \Omega/\text{km}$ e sequência positiva $Z_{L1}=0,041+j0,3878 \Omega/\text{km}$. A saturação do TC é simulada para uma falta a 10 km da barra 1, com a frequência de amostragem igual a 5760 HZ (96 amostras/ciclo). Os sinais obtidos são carregados no Matlab®, possibilitando a implementação dos métodos de detecção e compensação dos intervalos distorcidos pela saturação do TCs.

A simulação de transitórios em TCs foi feita por meio de um modelo comumente usado em programas de transitórios eletromagnéticos, descrito na publicação de KEZUNOVIC et al. (1994). O modelo de TC usado possui um núcleo saturável e o seu ramo de magnetização secundário é representado por um indutor não linear tipo 96. O indutor tipo 96 necessita de uma característica de histerese, que foi gerada usando a função HYSDAT (programa auxiliar do ATP), para 2,05 A e 1,51V como joelho da curva. Nas simulações, foi usado um TC C400, com relação de transformação de 2000/5, com resistência e indutância secundária de $0,5 \Omega$ e $0,8 \text{ mH}$, respectivamente.

Foram simulados curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos, variando o fluxo remanescente em 0%, 25%, 50% e 80%, para cargas puramente resistivas de 4Ω e 10Ω .

O erro transitório foi calculado de acordo com a Expressão (37), onde i'_2 é a corrente compensada, i_1 a corrente primária e n a relação de transformação.

$$\text{erro} = \frac{n \cdot i'_2 - i_1}{\sqrt{2} \times i_1} \times 100\% \quad (37)$$

Para autenticar o método de compensação e obter os valores RMS dos sinais ideal e corrigido, foi usado um filtro de Fourier de ciclo completo.

4.3 Casos Simulados

4.3.1 Falta Trifásica: Carga Resistiva de 4Ω e 50% Remanescente

Para o caso simulado o valor RMS máximo da corrente de curto-circuito trifásico foi de aproximadamente 3240 A referida ao lado primário do transformador de corrente.

Em regime permanente o valor da corrente RMS é de aproximadamente 3052 A, também referido ao primário do TC. Para um fluxo remanescente de 50%, as distorções no sinal de corrente ocorrem a partir do segundo ciclo do sinal analisado.

4.3.1.1 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação através das Funções-Diferença do Sinal Analisado

Os resultados da combinação entre a técnica de detecção por funções-diferença e correção por mínimos quadrados, para este caso, podem ser visualizados na Figura 15, onde as formas de onda corrigida e distorcida estão representadas em (a), os valores da terceira função-diferença em (b), a atuação do detector em (c) e em (d) os valores do erro transitório percentual.

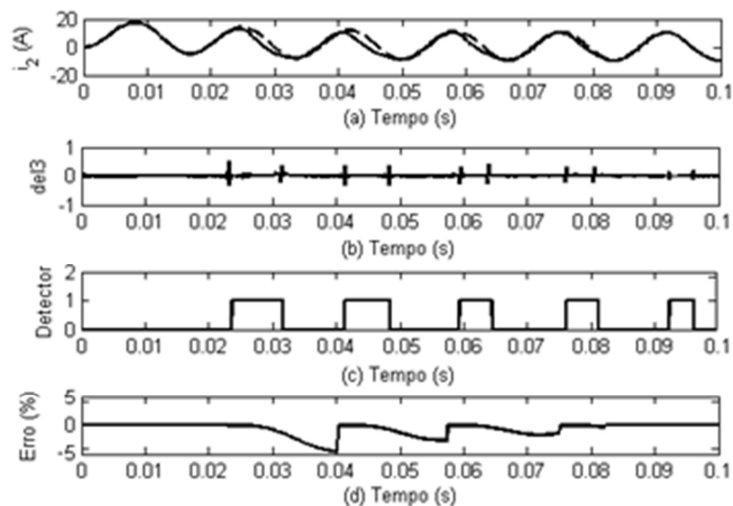


Figura 15 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Terceira função-diferença (del3). (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

Em (c), verifica-se que a partir do segundo ciclo após o início da falta, foram detectados adequadamente os cinco intervalos de saturação. Porém o segundo intervalo teve o seu início atrasado em uma amostra. Isso justifica o elevado erro transitório percentual na correção do sinal durante esse intervalo.

O valor absoluto máximo do erro transitório foi de 5,0520%, e ocorreu devido a detecção atrasada em uma amostra do início do segundo intervalo de saturação. Apesar de esse erro ser consideravelmente alto, não prejudicou a correção do sinal. Isso pode ser

observado na Figura 16, onde se verifica a boa aproximação entre os valores RMS do sinal corrigido e ideal.

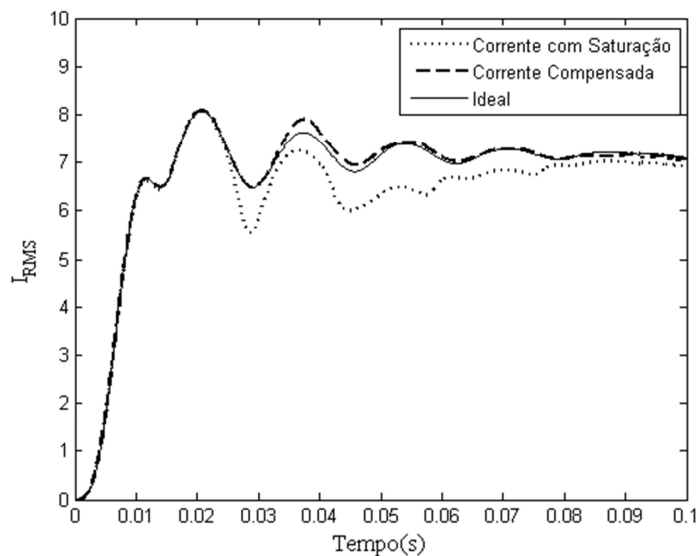


Figura 16 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.1.2 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação pela Saturação por Morfologia Matemática

Os resultados da combinação entre a técnica de detecção por morfologia matemática e correção por mínimos quadrados, para este caso, podem ser visualizados na Figura 17, onde em (a) são mostrados o sinal de corrente compensado e o sinal distorcido, em (b) o detalhe do sinal com seus incrementos significativos e em (c) a atuação do detector e em (d) os valores do erro transitório percentual.

A técnica de detecção atuou adequadamente, encontrando todos os cinco intervalos saturados, até mesmo o último trecho distorcido de menor relevância. O valor absoluto máximo erro transitório para essa compensação foi de 0,4630%, não prejudicando a qualidade da correção.

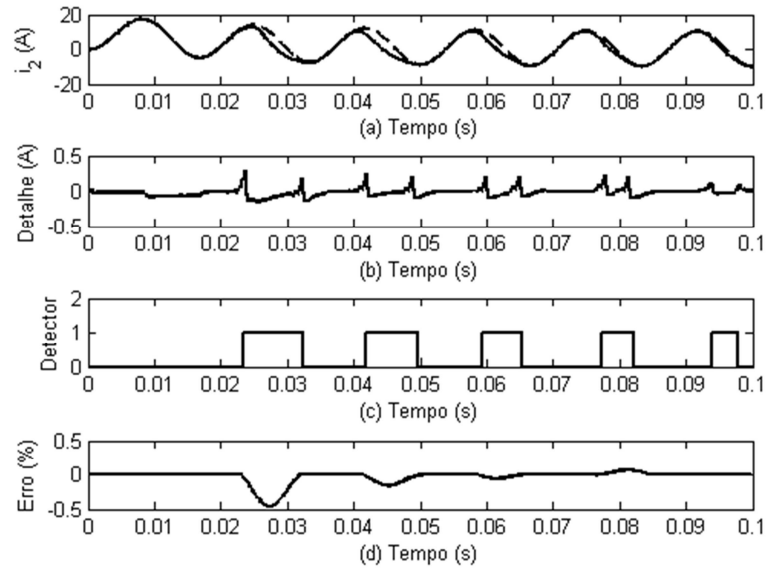


Figura 17 - Resultado para a detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

A qualidade da compensação do sinal distorcido pode ser vista na Figura 18, pela grande proximidade entre os valores RMS do sinal corrigido e do sinal ideal.

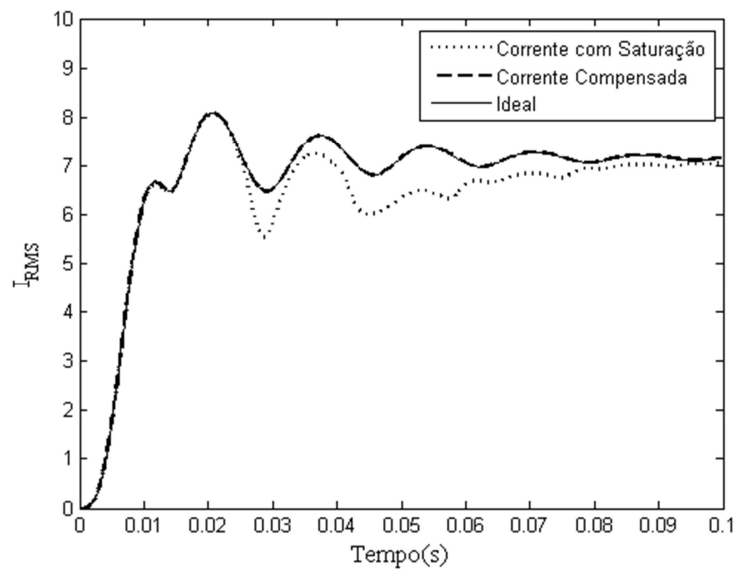


Figura 18 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.1.3 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação Através da Terceira Derivada

A técnica fundamentada na terceira derivada encontrou os cinco intervalos de saturação existentes. Porém, ocorreu um erro na detecção do final do primeiro intervalo saturado, que não foi encontrado, de acordo com a Figura 19 (b).

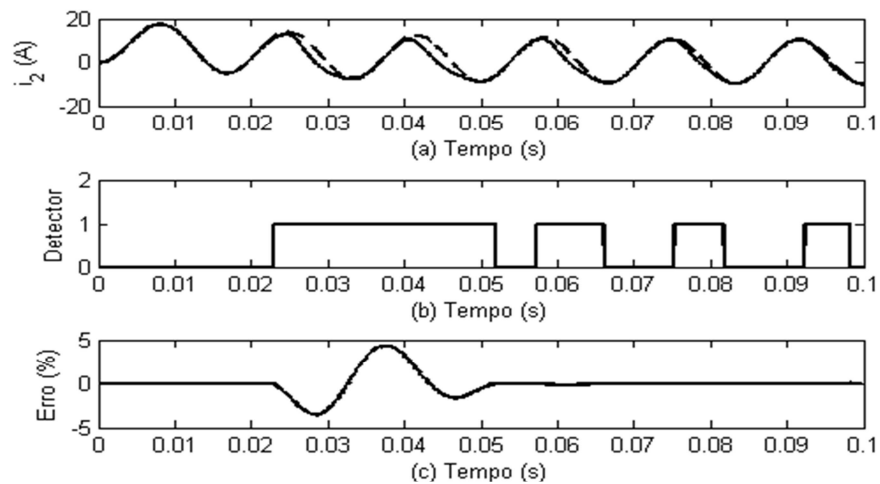


Figura 19 - Resultado para a detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.

O método de compensação, induzido pelo erro da metodologia de detecção, atuou desde o início do intervalo de saturação presente no segundo ciclo do sinal, até a detecção do final do trecho distorcido, já no terceiro ciclo do referido sinal. Entretanto, isso não afetou significativamente o desempenho da compensação.

O valor absoluto máximo do erro transitório para essa análise foi de 4,3026%, conforme mostrado na Figura 19 (c). Esse erro ocorre porque são utilizadas amostras anteriores ao primeiro intervalo de saturação durante a compensação de todo o trecho considerado saturado pelo detector. Evidentemente, durante o cálculo dos parâmetros $C1$, $C2$, λ e B , obteve-se a característica exponencial do segundo ciclo do sinal, proporcionando maiores erros ao sinal corrigido durante este trecho.

A compensação do sinal distorcido pode ser vista na Figura 20, onde pode ser notada a boa proximidade entre os valores RMS do sinal corrigido e do sinal ideal. Sendo, a aproximação entre os dois sinais bem satisfatórios.

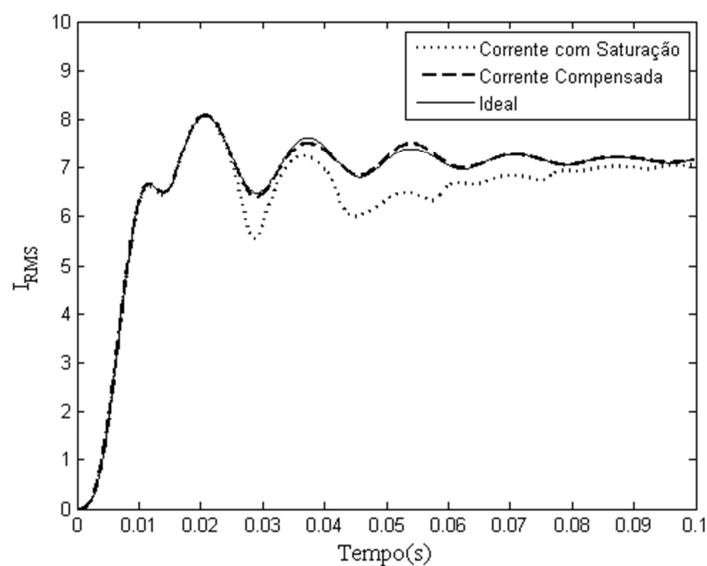


Figura 20 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.2 Falta Trifásica: Carga Resistiva de 4Ω e 80% Remanescente

Como previsto, o aumento do fluxo remanescente no núcleo do transformador de corrente provocou a saturação mais rápida do mesmo, diminuindo o tempo até a saturação. A saturação do TC ocorreu já no primeiro ciclo após o início da falta e seus efeitos foram verificados até o sexto ciclo do sinal.

4.3.2.1 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação através das Funções-Diferença do Sinal Analisado

Para esse caso, o método de detecção através das funções-diferença determinou corretamente os intervalos de saturação, detectando os trechos distorcidos nos seis ciclos após a ocorrência da falta. Até mesmo os dois últimos intervalos distorcidos de curta duração foram detectados adequadamente, de acordo com o mostrado na Figura 21 (c). Os resultados usando essa metodologia podem ser vistos na Figura 21.

Além disso, os valores para o erro transitório da compensação aparecem na Figura 21 (d). O valor absoluto máximo desse erro transitório foi de 0,5682%, ocorrido durante a compensação do segundo intervalo de saturação. A qualidade da compensação pode ser vista na Figura 22, devido a ótima aproximação entre os valores RMS do sinal corrigido e ideal.

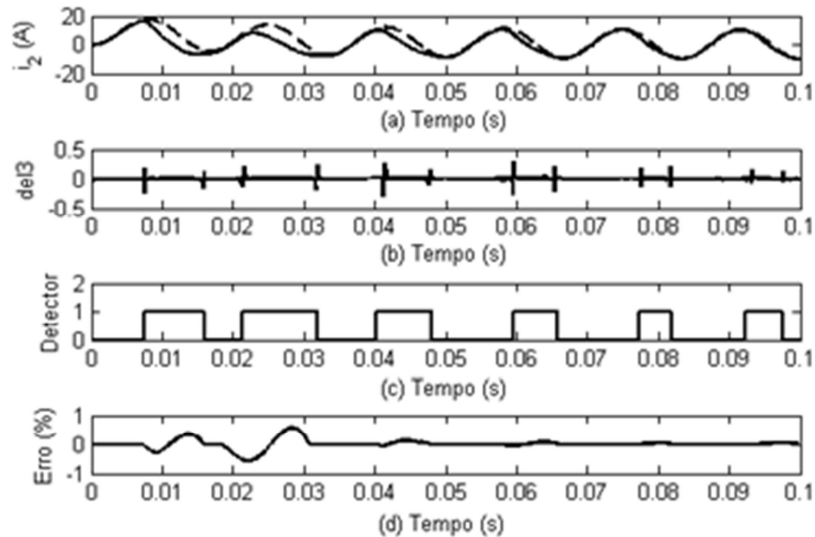


Figura 21 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Terceira função-diferença (del3). (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

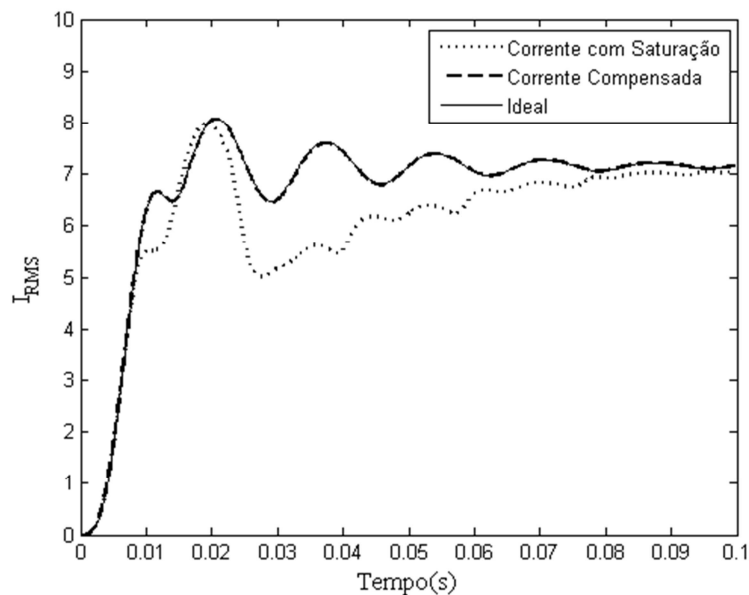


Figura 22 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.2.2 Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Morfologia Matemática

A técnica de detecção pelo método da Morfologia Matemática determinou com uma boa precisão todos os intervalos saturados presentes no sinal. No primeiro trecho compensado o valor absoluto máximo do erro transitório foi de 0,8573% e no segundo trecho o valor absoluto para o erro foi de 0,5860%.

Os resultados da combinação do método de detecção através da morfologia matemática e compensação por mínimos quadrados são mostrados na Figura 23, onde em (a) é mostrada a corrente compensada, em (b) o detalhe do sinal, em (c) a atuação do detector e em (d) os valores do erro transitório percentual.

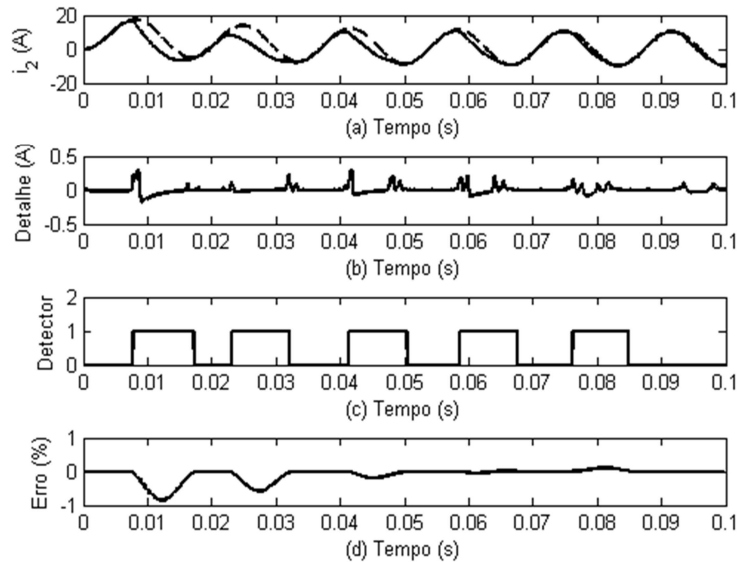


Figura 23 - Resultado para a detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

Na Figura 24, são mostrados os valores RMS da compensação do sinal saturado. Em função do baixo valor do erro, a correção do sinal não foi comprometida, o que justifica a boa aproximação entre a corrente RMS compensada e ideal.

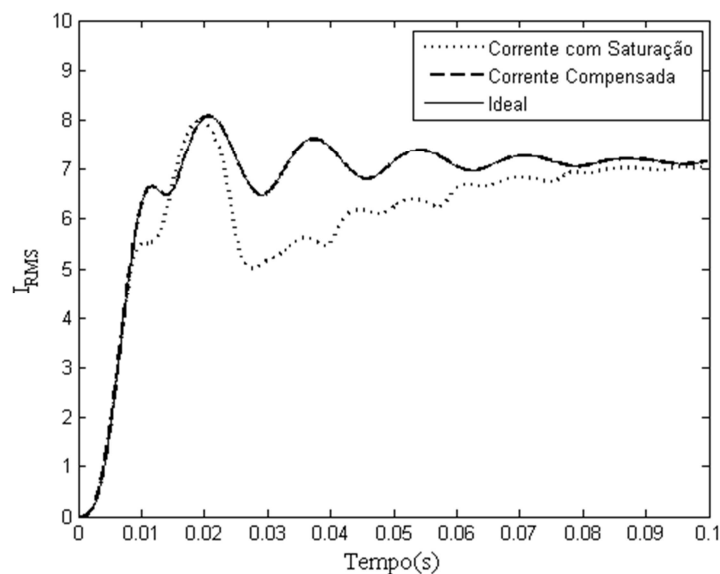


Figura 24 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.2.3 Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação Através da Terceira Derivada

Os resultados da combinação do método de detecção através da Terceira Derivada e compensação por morfologia matemática são mostrados na Figura 25, onde em (a) é mostrada a corrente compensada, em (b) a atuação do detector e em (c) os valores do erro transitório percentual na correção do sinal distorcido.

A metodologia detectou os seis intervalos distorcidos, até mesmo o último intervalo saturado de menor relevância. Entretanto, o início do segundo intervalo foi detectado com atraso de uma amostra, justificando o erro transitório percentual durante a compensação desse trecho, que teve o valor absoluto máximo de 2,0352%. Esse erro existe porque há uma pequena diferença entre o sinal corrigido e o sinal ideal, devido ao erro na estimação dos parâmetros quando é utilizado uma amostra de um trecho saturado para a correção do sinal distorcido. Esse valor de erro não prejudicou a correção do sinal, conforme pode ser visto, na Figura 26.

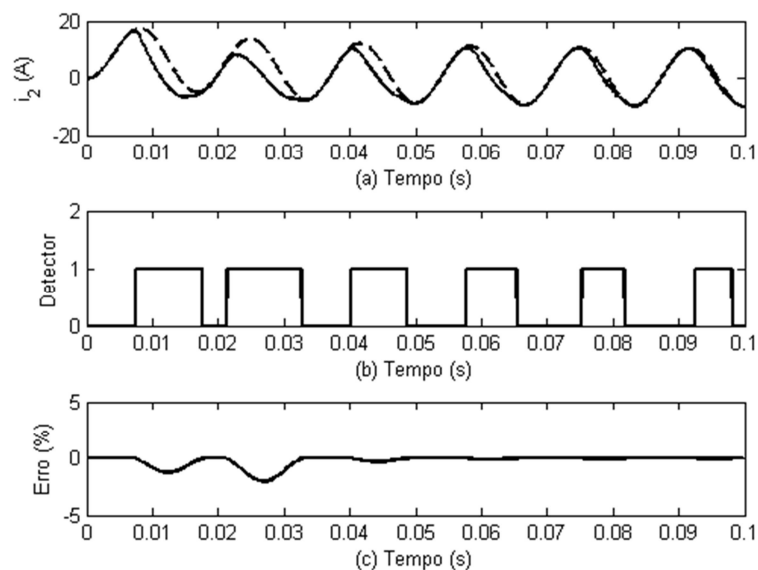


Figura 25 - Resultado para a detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.

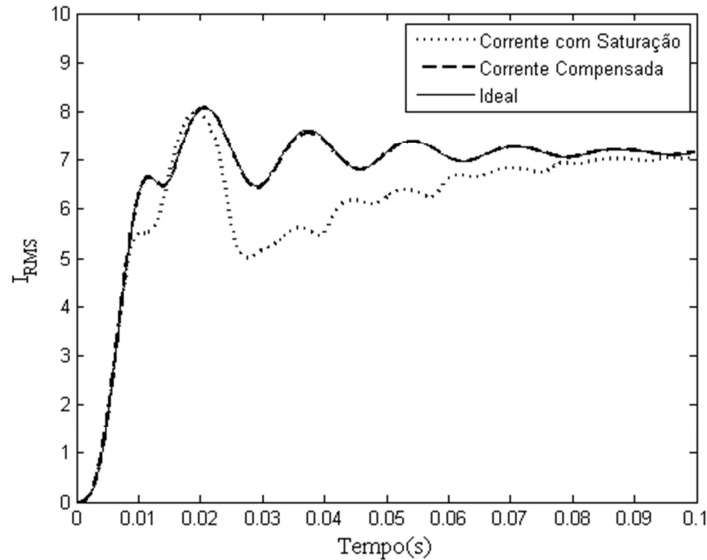


Figura 26 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.3 Falta Trifásica: Carga Resistiva de 10Ω e 50% Remanescente

Quando conectada ao secundário do transformador de corrente uma carga de 10 ohms, verificou-se uma maior severidade das distorções na forma de onda da corrente secundária, ocorridas em virtude da saturação, causando variações mais bruscas nos pontos que caracterizam o início e o fim do intervalo saturado.

Todos os resultados a seguir foram obtidos para um fluxo remanescente no núcleo do TC de 50%. Nesse caso, foi observado que o transformador de corrente satura do primeiro ao sexto ciclo, em função do aumento da carga do TC.

4.3.3.1 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação através das Funções-Diferença do Sinal Analisado

A associação entre a técnica de detecção por funções-diferença e correção por mínimos quadrados obteve bons resultados para uma falta trifásica nessas condições de carregamento e fluxo remanescente do TC. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 27.

As variações que caracterizam o início e fim do trecho saturado podem ser percebidas através da terceira função-diferença del3, mostrados na Figura 27 (b). A atuação do detector é mostrada em (c), onde os seis intervalos saturados são detectados. Entretanto, o início do segundo intervalo saturado foi detectado uma amostra após o início da saturação, caracterizando uma detecção atrasada. Isso justifica o valor absoluto máximo do erro

transitório, que foi de 1,2256%, ocorrido durante a compensação do segundo intervalo de saturação detectada.

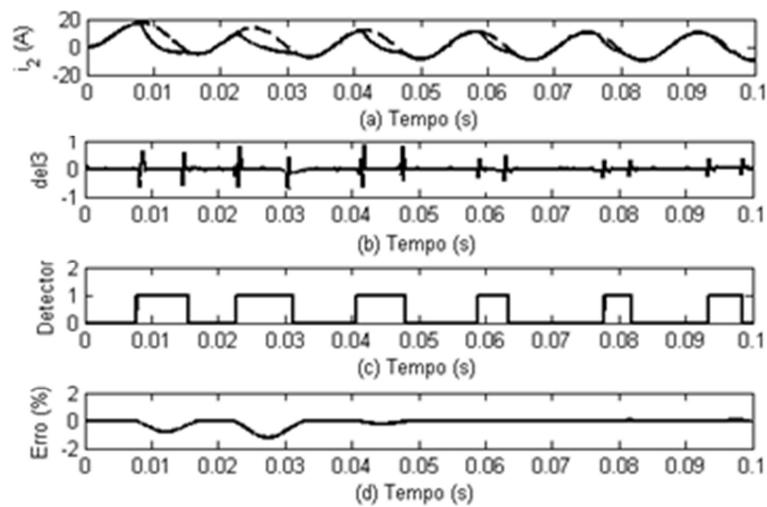


Figura 27 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Terceira função-diferença (del3). (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

A Figura 28 mostra os valores RMS da correntes distorcida, ideal e corrigida, onde pode se verificar a boa aproximação entre o sinal corrigido e o sinal ideal de corrente secundária, validando qualidade da associação entre estas duas metodologias.

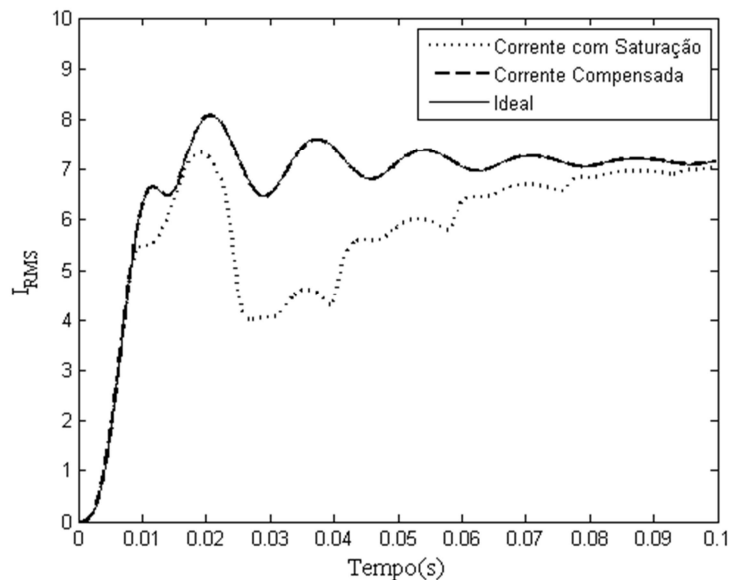


Figura 28 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.3.2 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação pela Saturação por Morfologia Matemática

Os resultados obtidos usando os operadores da morfologia matemática podem ser vistos na Figura 29, onde em (b) podem ser visualizados os incrementos que caracterizam o início e fim do intervalo distorcido e em (c) a atuação do detector.

Foram detectados os seis intervalos distorcidos pela saturação, até mesmo os dois últimos intervalos com saturação de menor relevância. O erro transitório percentual máximo, em módulo, para este caso foi de 0,5279% e ocorreu durante a correção do primeiro intervalo distorcido detectado, por ser um trecho com saturação mais severa. Já o segundo trecho saturado teve um erro absoluto de 0,4242% e os nos trechos restantes o erro é de aproximadamente zero, conforme mostrado na Figura 29 (d).

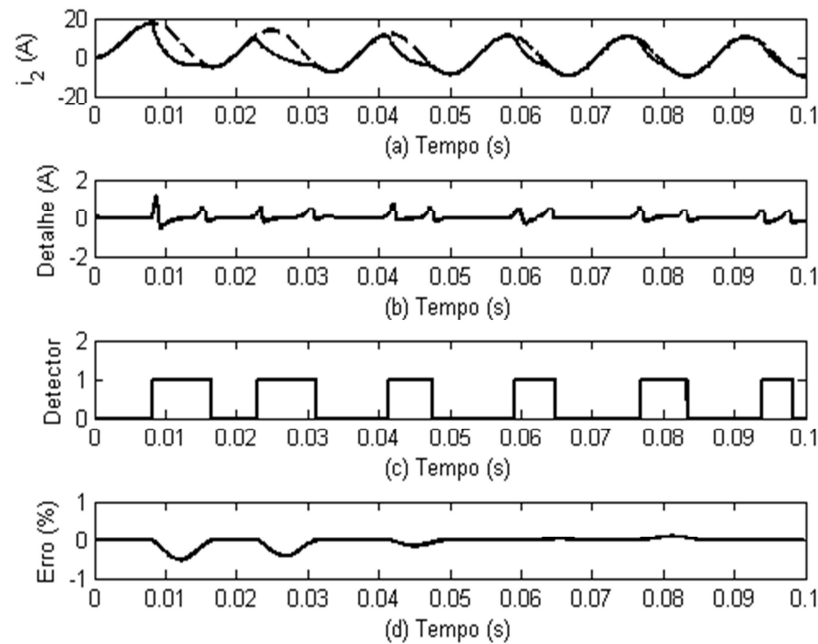


Figura 29 - Resultado para a detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

O valor RMS do sinal de corrente corrigido, do sinal de corrente ideal e o sinal de corrente distorcido podem ser vistos na Figura 30, onde pode ser notada a excelente aproximação entre os valores do sinal corrigido e do sinal ideal, demonstrando que a associação do método de detecção por morfologia matemática e correção por mínimos quadrados é uma alternativa robusta para esse caso.

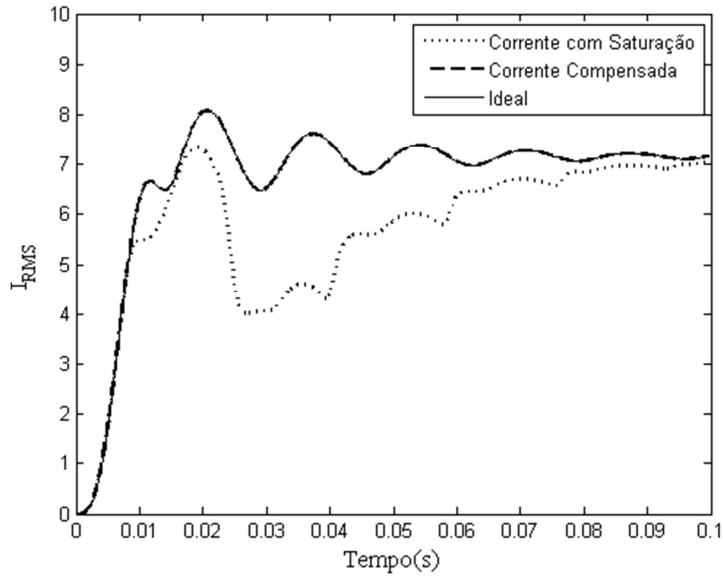


Figura 30 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.3.3 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação Através da Terceira Derivada

Os resultados obtidos usando esse método de detecção são mostrados na Figura 31. Foram determinados todos os seis intervalos distorcidos por saturação. Até o mesmo os dois últimos intervalos com saturação de menor relevância foram detectados adequadamente.

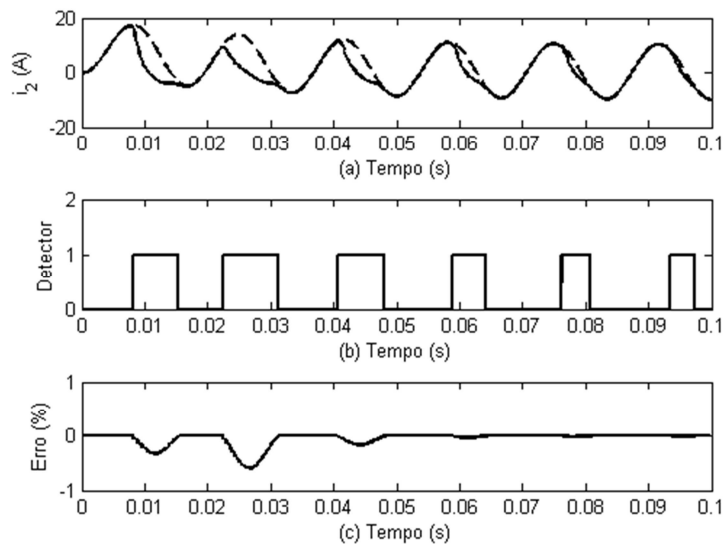


Figura 31 - Resultado para a detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.

O valor absoluto máximo do erro transitório para esse caso foi de 0,5972%. A atuação do detector aparece na Figura 31 (b), onde se iniciou a detecção a partir do primeiro ciclo, sendo que após 0,1 segundos nenhum trecho saturado foi encontrado. Em (c) é mostrado os valores do erro transitório percentual.

Os valores RMS para o sinal corrido são mostrados na Figura 32. Nota-se a boa qualidade da aproximação da correção em relação ao valor ideal, proporcionando uma grande melhora à característica do sinal quando comparado com o sinal distorcido original.

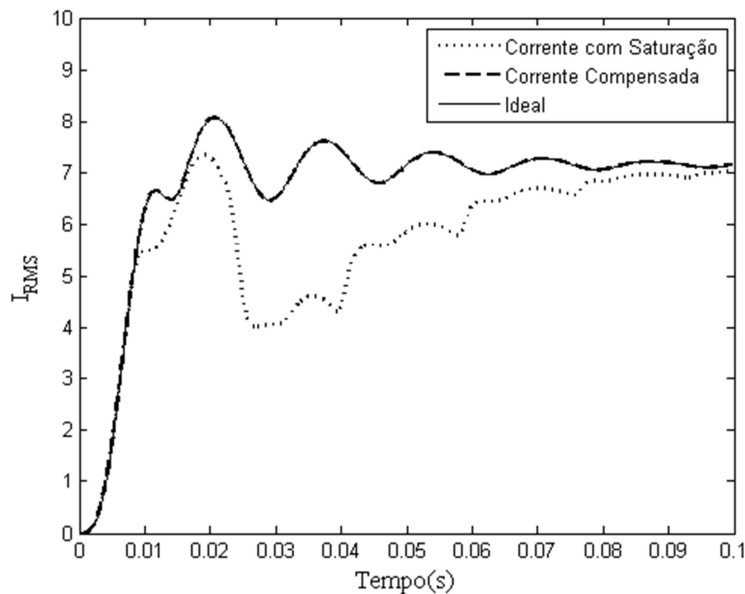


Figura 32 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.4 Falta Trifásica: Carga Resistiva de 10Ω e 80% Remanescente

Para este teste, foi mantida a carga de 10 ohms no secundário do TC, porém para um fluxo remanescente no núcleo de 80%. Com o aumento do fluxo, foi observado que as distorções foram mais severas do que quando realizadas com um fluxo remanescente de 50% para uma carga de 10 ohms. O TC continuou saturando no primeiro ciclo porém com a antecipação de algumas amostras. Os resultados das metodologias de detecção associadas com a de compensação podem ser vistas nas seções a seguir.

4.3.4.1 Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Funções-Diferença do Sinal Analisado

Essa técnica teve um bom desempenho na detecção dos intervalos distorcidos, pois todos os seis intervalos distorcidos foram detectados adequadamente. A até mesmo os dois últimos ciclos com distorções de pouca relevância (trecho de curta duração) foram detectados precisamente. Todavia, verificou-se um atraso de duas amostras na detecção do início do primeiro intervalo de saturação, o que contribuiu para um maior erro transitório durante a compensação desse trecho. Na Figura 33 (a), pode ser observado o resultado da correção, em (b) os valores da terceira função-diferença $\text{del}3$. Na Figura 33 (c) pode ser visto a atuação do detector e em (d) os valores do erro transitório percentual.

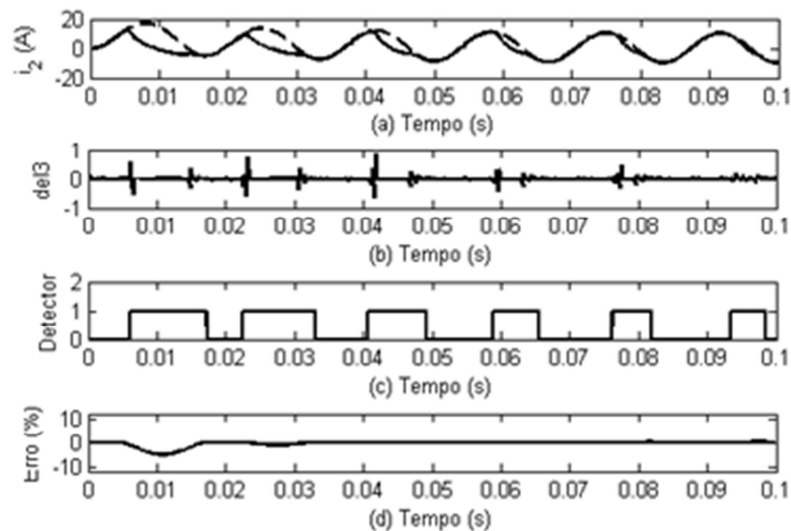


Figura 33 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Terceira função-diferença ($\text{del}3$). (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

O máximo valor absoluto do erro transitório foi de 5,1438%, ocorrendo durante a compensação do primeiro intervalo de saturação detectada.

Os valores RMS para essa compensação podem ser vistos na Figura 34, onde nota-se o bom desempenho da correção frente ao caso simulado, que garantiu boa proximidade entre os valores RMS da corrente corrigida e a corrente ideal.

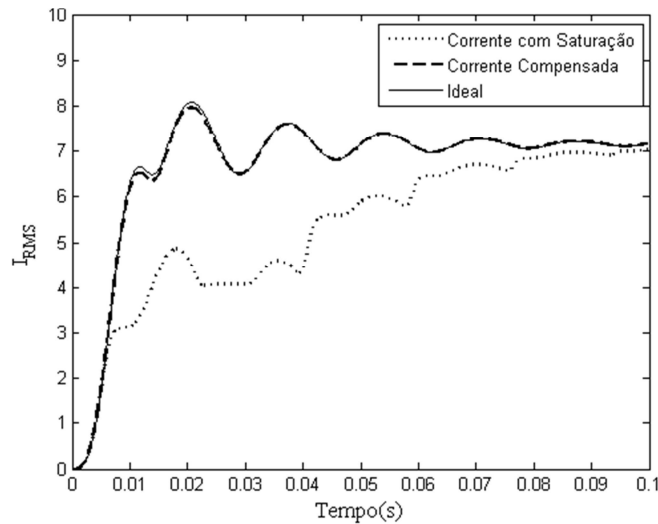


Figura 34 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.4.2 Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Morfologia Matemática

Essa metodologia de identificação dos intervalos distorcidos por saturação obteve bons resultados, detectando todos os intervalos distorcidos. Porém, o primeiro intervalo distorcido foi detectado com atraso de uma amostra. Isso justifica o maior erro transitório durante a compensação do primeiro trecho, pois uma amostra do respectivo trecho saturado é envolvida no cálculo da estimação dos parâmetros C_1 , C_2 , λ e B .

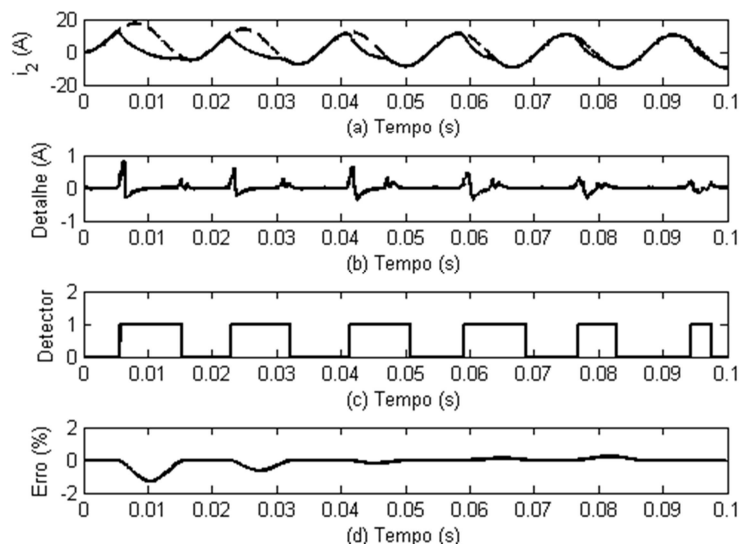


Figura 35 - Resultado para a detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (traçada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

A associação entre as duas metodologias proporcionou uma boa compensação do sinal distorcido, aproximando os valores RMS dos sinais de corrente corrigido e ideal, conforme é mostrada na Figura 36.

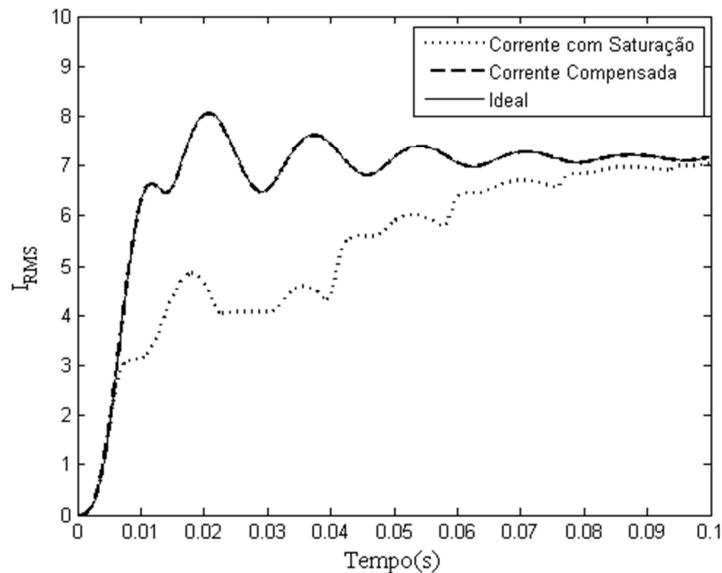


Figura 36 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.4.3 Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação Através da Terceira Derivada

Para essa associação de metodologias, foram detectados todos os seis intervalos distorcidos presentes no sinal. Como no caso anterior, foi verificada a detecção atrasada em uma amostra do primeiro intervalo de saturação, propiciando um erro transitório maior durante a compensação deste trecho. Os resultados para associação parecem na Figura 37, onde em (a) é mostrado a corrente saturada e a corrente distorcida, em (b) pode ser visualizada a atuação do detector e em (c) pode ser visualizado os valores do erro transitório percentual na correção do sinal distorcido.

Os valores RMS para os sinais de corrente ideal, corrigido e distorcido aparecem na Figura 38. Nessa Figura, pode-se notar a excelente melhora obtida para o sinal de corrente. Isso devido a boa reconstrução do sinal distorcido, elevando o seu valor RMS para valores bem próximos do sinal de corrente ideal.

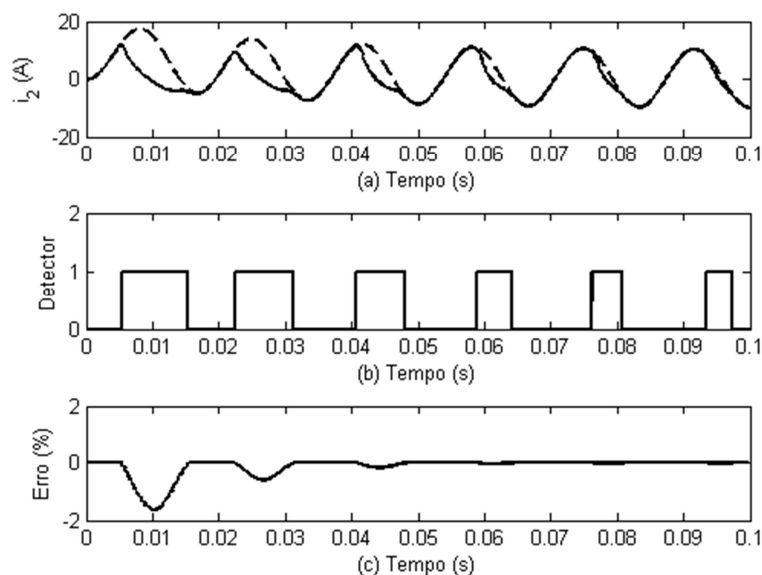


Figura 37 - Resultado para a detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.

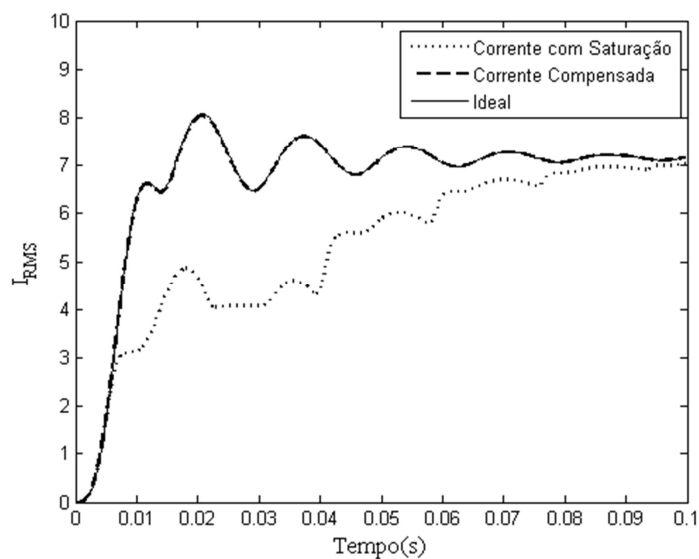


Figura 38 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.5 Falta Monofásica: Carga Resistiva de 4Ω e 50% Remanescente

Para um falta monofásica o valor RMS máximo da corrente de curto-circuito monofásico foi de 3119,2 A referida ao lado primária do transformador de corrente, de acordo com a Figura 40. E em regime permanente o valor da corrente RMS é de aproximadamente 2959,6 A, também referido ao primário do TC. Para um fluxo remanescente de 50% e carga de 4 ohms, as distorções no sinal de corrente ocorrem a partir do segundo ciclo do sinal analisado.

4.3.5.1 Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Funções-Diferença do Sinal Analisado

A técnica de detecção atuou adequadamente, determinando os cinco intervalos contendo distorção, ocorrido em virtude da saturação do núcleo, conforme mostrado na Figura 39 (c). Porém, o segundo intervalo teve a detecção do início atrasada em duas amostras e seu final adiantado em uma amostra prejudicando no desempenho da compensação. O valor absoluto máximo do erro transitório foi de 8,2750%.

Os resultados para essa análise são mostrados na Figura 39. As formas de onda do sinal corrigido e sinal distorcido são mostrados na Figura 39 (a) e os valores do erro percentual podem ser visualizados na Figura 39 (d).

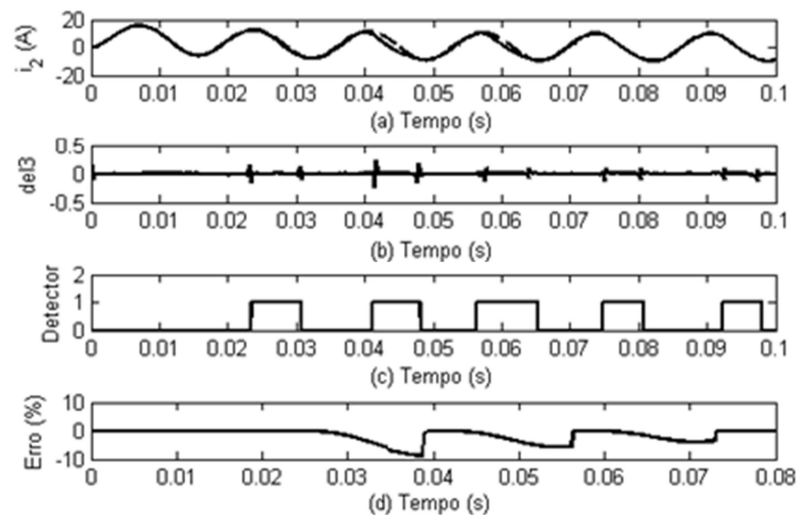


Figura 39 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Terceira função-diferença (del3). (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

Além disso, os valores RMS para o sinal corrigido podem ser vistos na Figura 40. Nota-se que a qualidade da compensação foi boa, apesar do elevado erro transitório durante a compensação do primeiro intervalo de saturação detectada, devido à proximidade entre os valores RMS do sinal de corrente corrigido em relação aos valores ideais, proporcionando uma melhora significativa na qualidade do sinal.

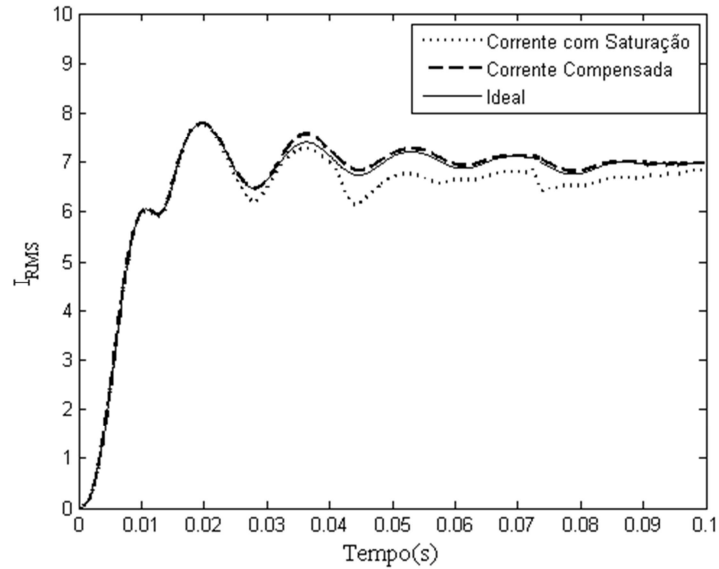


Figura 40 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.5.2 Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Morfologia Matemática

A detecção por morfologia matemática determinou com boa precisão os intervalos distorcidos presentes no sinal. Durante a compensação o erro foi baixo, tendo o seu valor absoluto máximo de 0,0972%, conforme mostrado na Figura 41 (d). Esse erro pode ser caracterizado como um erro normal na estimação dos parâmetros de compensação.

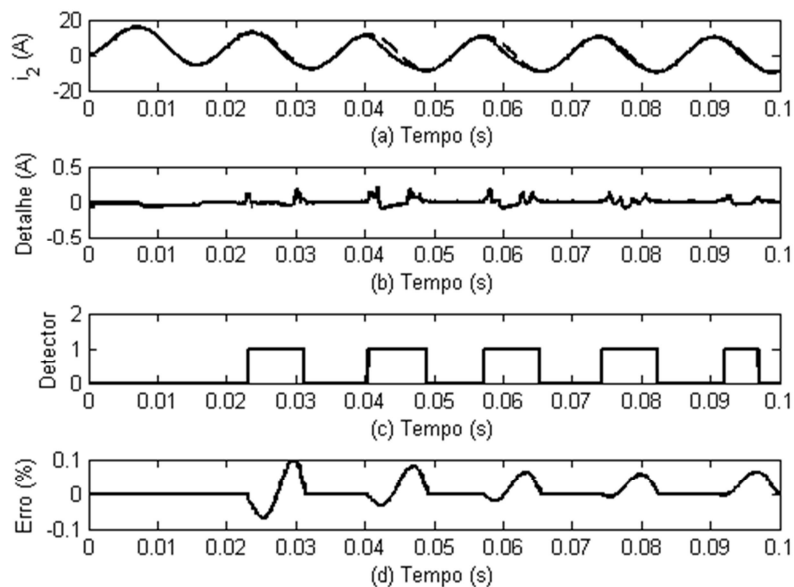


Figura 41 - Resultado para a detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

A Figura 42 mostra os valores RMS para a compensação, que se aproximou bastante dos valores ideais.

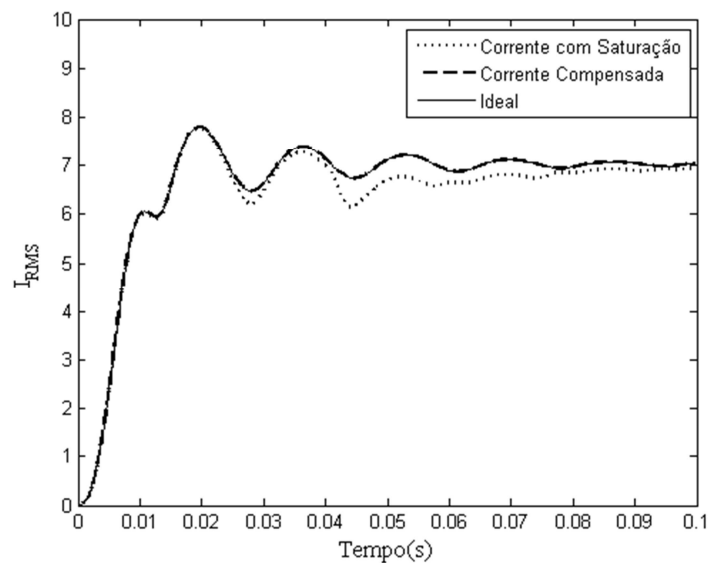


Figura 42 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.5.3 Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação Através da Terceira Derivada

Para esse método de detecção os resultados são mostrados na Figura 43. A metodologia de detecção não encontrou o final do primeiro intervalo saturado, fazendo com que os erros transitórios percentuais fossem maior durante o intervalo, correspondente ao início do primeiro intervalo distorcido até o final do trecho saturado pertencente ao terceiro ciclo do sinal. A atuação do detector é mostrada na Figura 43(b)

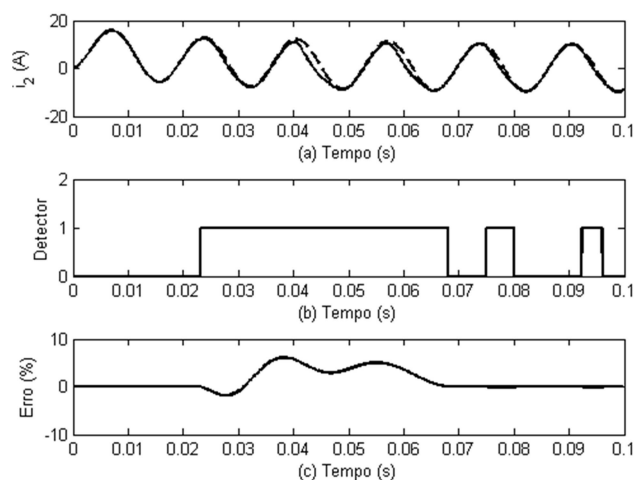


Figura 43 - Resultado para a detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.

O valor absoluto máximo do erro foi de 6,1211%, ocorrido durante a compensação do trecho erroneamente detectado como distorcido. Esse erro ocorreu, porque para a compensação do segundo trecho distorcido, foram usados pontos distantes do início e fim do mesmo, estimando de forma incorreta os parâmetros de compensação e diminuindo a precisão do método.

Apesar de o erro ser elevado durante a compensação do primeiro e segundo intervalo, a metodologia de correção obteve bons resultados. Isso pode ser validado pela boa aproximação em relação aos valores RMS do sinal compensado e ideal e a melhora do sinal distorcido após a correção do mesmo. Os valores RMS para o sinal corrigido são mostrados na Figura 44.

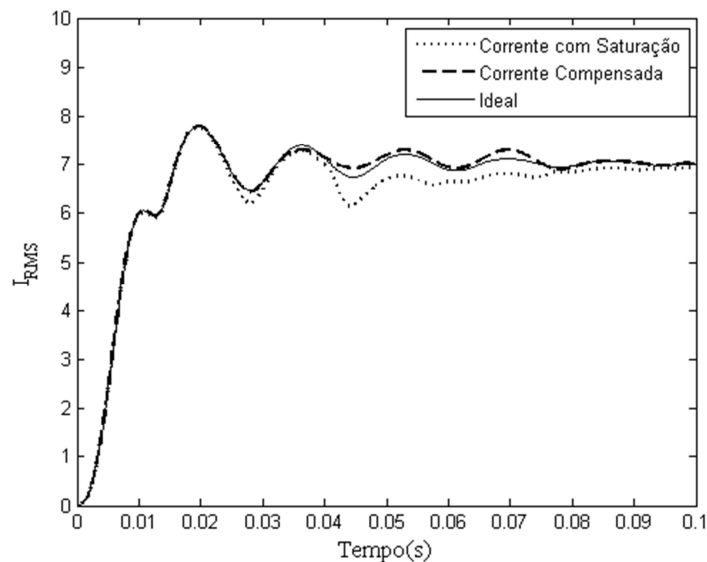


Figura 44 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.6 Falta Bifásica: Carga Resistiva de 10Ω e 50% Remanescente

Para um falta bifásica o valor RMS máximo da corrente de curto-circuito foi de aproximadamente 3119,2 A referida ao lado primária do transformador de corrente. E em regime permanente o valor da corrente RMS é de aproximadamente 2960 A, também referido ao primário do TC. Para um fluxo remanescente de 50% e carga de 10 ohms, as distorções no sinal de corrente ocorrem a partir do primeiro ciclo.

4.3.6.1 Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Funções-Diferença do Sinal Analisado

A metodologia de detecção que utiliza a terceira função-diferença atuou corretamente, determinando precisamente os intervalos distorcidos presentes no sinal de corrente.

A terceira função-diferença é mostrada na Figura 45 (b), onde é possível notar os incrementos significativos que caracterizam o início e o fim dos trechos distorcidos. Foram detectados os seis intervalos de saturação a partir do primeiro ciclo do mesmo.

Os resultados para a correção do sinal através da técnica dos Mínimos Quadrados podem ser vistos na Figura 45 (a). Além disso, o erro transitório percentual para essa compensação pode ser visto na Figura 45 (d). O seu valor absoluto máximo foi de 1,1776% e ocorreu no primeiro intervalo de saturação detectado.

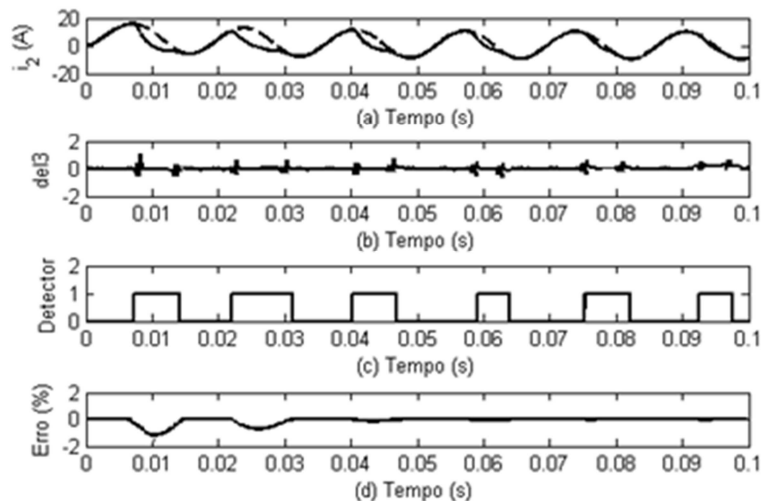


Figura 45 - Resultado para a detecção através das funções-diferença e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Terceira função-diferença ($\text{del}3$). (c) Detector de saturação. (f) Erro transitório percentual.

A Figura 46 mostra os valores RMS do sinal corrigido, ideal e distorcido. Nessa figura é possível perceber a melhora no sinal de corrente secundária após a correção, já que foi conseguida uma excelente aproximação entre o sinal corrigido e o sinal ideal.

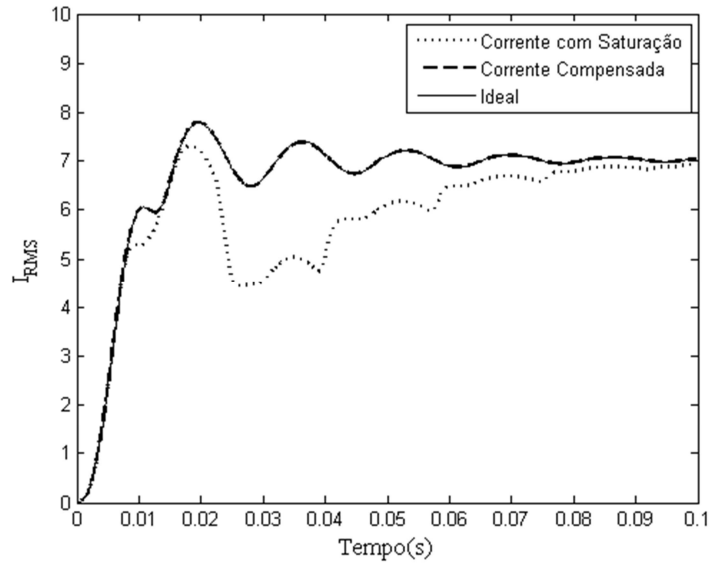


Figura 46 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.6.2 Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação por Morfologia Matemática

A técnica de detecção usando os operadores da Morfologia Matemática atuou corretamente, determinando a presença de saturação nos seis ciclos, incluindo os dois últimos intervalos de saturação cujas distorções são de menor relevância.

O erro absoluto máximo para este caso foi de 0,4070%, ocorrido no instante 0,0111 segundos. Esses resultados podem ser vistos na Figura 47.

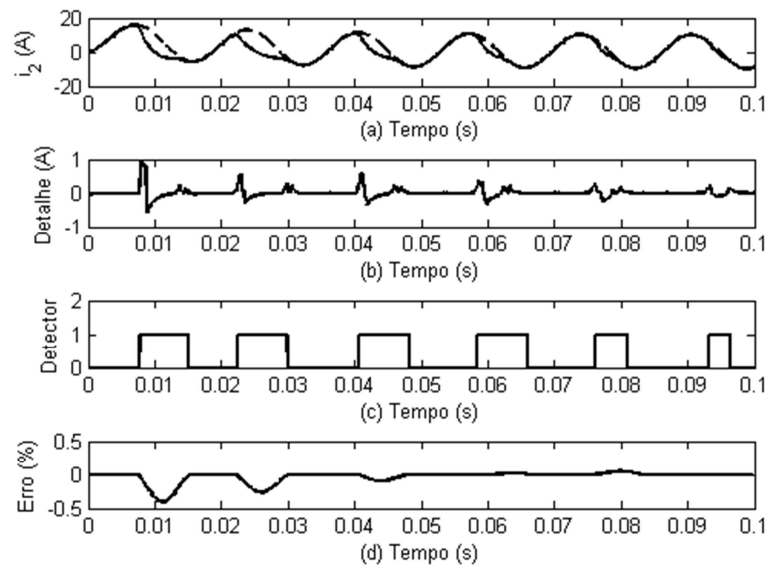


Figura 47 - Resultado para a detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

Os valores RMS para o sinal corrigido, sinal ideal e sinal distorcido, são mostrados na Figura 48, onde pode ser notada a melhora obtida no sinal de corrente, com a correção do sinal distorcido, tendo em vista a excelente aproximação entre o sinal corrigido e o sinal ideal.

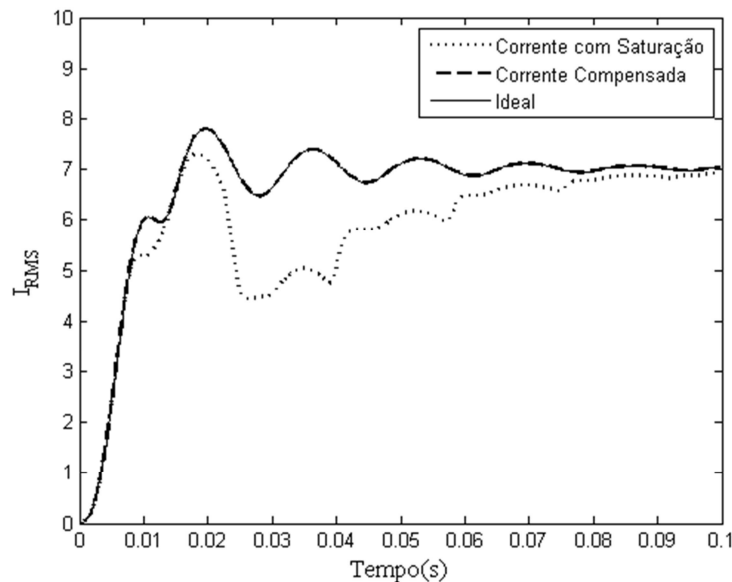


Figura 48 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.3.6.3 Resultados para a Detecção dos Intervalos Distorcidos pela Saturação Através da Terceira Derivada

Os resultados conseguidos para a correção associada a detecção através da terceira derivada aparecem na Figura 49. As formas de onda corrigida e distorcida por saturação aparecem na Figura 49 (a). A terceira derivada apresentou um excelente desempenho para este caso, encontrando todos os intervalos distorcidos por saturação, conforme pode ser visto na Figura 49 (b).

O erro transitório máximo da compensação foi 0,6472 e ocorreu durante a correção do segundo intervalo detectado.

A boa qualidade da correção pode ser visualizada na Figura 50, onde são mostrados os valores RMS para o sinal ideal, o sinal corrigido e o sinal distorcido. A melhora na qualidade do sinal é facilmente visualizada pela excelente aproximação entre o sinal de corrente corrigido e o sinal ideal.

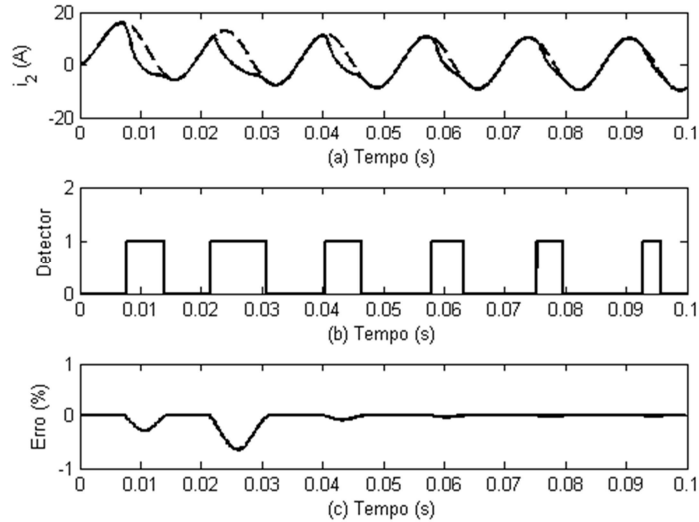


Figura 49 - Resultado para a detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente secundária corrigido (tracejada) e sinal de corrente distorcido pela saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.

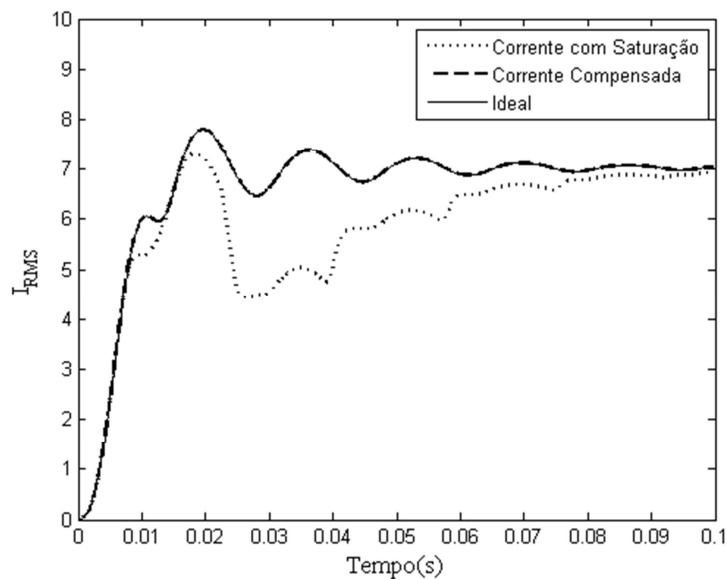


Figura 50 - Valores RMS do sinal distorcido, sinal compensado e sinal ideal.

4.4 Tempos de Processamento das Metodologias

Os tempos de processamento foram cronometrados no Matlab[®], usando a função Tic e Toc, que respectivamente iniciam e finalizam a contagem.

As técnicas foram implementadas para uma amostragem de 96 amostras por ciclo, sendo o tempo entre duas amostras de 174 μ s. Desta, forma o tempo de processamento das metodologias de detecção e da metodologia de compensação devem ser inferiores a esse intervalo, para serem viáveis em aplicações em tempo real.

Os resultados da combinação entre as metodologias de detecção com a metodologia de compensação foram satisfatórios em relação ao tempo de processamento. Das três metodologias analisadas, a que apresentou melhor desempenho foi à detecção por Terceira Derivada, levando no máximo 16 μ s para a detecção do intervalo saturado. Já a técnica da Morfologia Matemática teve o pior desempenho entre as três técnicas de detecção, levando 31 μ s no máximo para a detecção do intervalo saturado. A técnica de detecção usando as Funções-Diferença teve um tempo de processamento igual a 25 μ s

A metodologia compensação por Mínimos Quadrados, utilizando pontos anteriores e posteriores aos respectivos intervalos saturados, levou um tempo de processamento máximo de 130 μ s para a estimação dos parâmetros C_1 , C_2 , λ e B. Lembrando que, para cada intervalo a ser corrigido, os parâmetros de estimação são calculados apenas uma vez após a matriz e o vetor com os valores de corrente secundária serem preenchidos. Já para o cálculo de cada ponto do sinal corrigido o tempo não excedeu 5 μ s.

De acordo com os resultados obtidos, a combinação da metodologia de compensação com qualquer uma das três metodologias de detecção é possível para aplicação em tempo real.

4.5 Resultados Resumidos

Para facilitar a análise dos resultados foram construídas tabelas contendo o valor absoluto máximo de erro transitório percentual para cada caso analisado (Tabela 4 a Tabela 9) e também para o tempo de processamento de cada método discutido neste trabalho (Tabela 10).

Tabela 4 - Valor absoluto máximo do erro transitório para o primeiro caso analisado

Falta Trifásica: Carga Resistiva de 4 Ω e 50% Fluxo Remanescente	
Metodologia	Erro Absoluto Máximo Percentual
Funções-Diferença	5,0520%
Morfologia Matemática	0,4630%
Terceira Derivada	4,3026%

Tabela 5 - Valor absoluto máximo do erro transitório para o segundo caso analisado

Falta Trifásica: Carga Resistiva de 4Ω e 80% Fluxo Remanescente

Metodologia	Erro Absoluto Máximo Percentual
Funções-Diferença	0,5682%
Morfologia Matemática	0,8573%
Terceira Derivada	2,0352%

Tabela 6 - Valor absoluto máximo do erro transitório para o terceiro caso analisado

Falta Trifásica: Carga Resistiva de 10Ω e 50% Fluxo Remanescente

Metodologia	Erro Absoluto Máximo Percentual
Funções-Diferença	1,2256%
Morfologia Matemática	0,5279%
Terceira Derivada	0,5972%

Tabela 7 - Valor absoluto máximo do erro transitório para o quarto caso analisado

Falta Trifásica: Carga Resistiva de 10Ω e 80% Fluxo Remanescente

Metodologia	Erro Absoluto Máximo Percentual
Funções-Diferença	5,1438%
Morfologia Matemática	1,3079%
Terceira Derivada	1,6399%

Tabela 8 - Valor absoluto máximo do erro transitório para o quinto caso analisado

Falta Monofásica: Carga Resistiva de 4Ω e 50% Fluxo Remanescente

Metodologia	Erro Absoluto Máximo Percentual
Funções-Diferença	8,2750%
Morfologia Matemática	0,0972%
Terceira Derivada	6,1211%

Tabela 9 - Valor absoluto máximo do erro transitório para o sexto caso analisado

Falta Bifásica: Carga Resistiva de 10Ω e 50% Fluxo Remanescente	
Metodologia	Erro Absoluto Máximo Percentual
Funções-Diferença	1,1776%
Morfologia Matemática	0,4070%
Terceira Derivada	0,6472%

Tabela 10 – Tempo de processamento de cada metodologia proposta

Metodologia	Tempo Máximo de Processamento
Funções-Diferença	25 μs
Morfologia Matemática	31 μs
Terceira Derivada	16 μs
Mínimos Quadrados	135 μs

4.6 Considerações Finais

Após a análise dos casos teste e avaliação dos tempos de processamento demandados pelas metodologias testadas, foram feitas algumas conclusões quanto à qualidade do desempenho e aplicabilidade dessas técnicas.

Para as três técnicas de detecção foram verificadas que todas demonstram-se ser viáveis para a aplicação em tempo real, sendo que nenhuma técnica demandou um tempo de processamento maior do que o intervalo entre duas amostras consecutivas.

Além disso, dentre os três métodos de detecção, o que apresentou o menor tempo de resposta foi à técnica fundamentada na Terceira Derivada, levando 16μs para realizar a detecção do intervalo saturado. A que teve o pior desempenho no tempo de processamento foi à técnica fundamentada na Morfologia Matemática, levando 31μs. Já a técnica baseada nas Funções-Diferença teve um tempo de resposta de 25μs. A metodologia de compensação por Mínimos Quadrados levou aproximadamente 135μs para realizar a compensação de um ponto dos intervalos distorcidos.

Além da análise do tempo de resposta, as metodologias de detecção também foram avaliadas pela precisão na detecção dos intervalos saturados, onde em cada caso analisado foi notado uma variação no desempenho. A técnica que se destacou foi a fundamentada na Morfologia Matemática, embora tenha tido alguns atrasos na detecção dos inícios dos intervalos saturados. As demais técnicas analisadas também obtiveram bom desempenho. Entretanto, a técnica fundamentada na terceira Funções-Diferença apresentou maior número de atrasos na detecção dos inícios dos trechos distorcidos por saturação. Já a técnica da Terceira Derivada, também apresentou atrasos na detecção dos inícios e em alguns casos não detectou o final dos intervalos distorcido.

O desempenho da técnica de compensação depende da precisão dos detectores. Contudo, em todos os casos analisados as correções utilizando Mínimos Quadrados foram bem sucedidas, apresentando erros transitórios relativamente baixos durante a compensação e garantindo a melhora no sinal distorcido.

Como esperado a metodologia fundamentada na Morfologia Matemática, foi a que apresentou menor erro transitório percentual, pois obteve melhor desempenho na detecção dos intervalos distorcidos por saturação. A técnica de compensação obteve maiores erros percentuais quando associada à técnica fundamentada na terceira Função-Diferença.

Por fim, vale ressaltar que, embora tenha sido destacado o desempenho da metodologia fundamentada na Morfologia Matemática, as outras técnicas de detecção também apresentaram bons resultados, sendo todas as associações analisadas viáveis para aplicação em tempo real.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

Este trabalho abordou assuntos relacionados à saturação dos Transformadores de corrente, levantando causas que levam a saturação do mesmo, bem como os principais problemas relacionados à proteção do sistema elétrico de potência. Também foram descritos os principais fundamentos dos TCs e suas especificações.

Além disso, foram discutidas três metodologias de detecção e uma metodologia de compensação dos intervalos distorcidos pela saturação dos TCs, como alternativas para melhorar a atuação dos relés de proteção em situações que envolvam a saturação do núcleo do transformador de corrente.

De forma a validar o estudo, os métodos de detecção foram avaliados em termos da capacidade de detecção e do tempo de processamento. Também, o método de compensação foi avaliado em termos da precisão na correção dos sinais distorcidos e do tempo de processamento.

A análise qualitativa dos métodos foi feita a partir de sinais gerados em simulações com o software EMTP-ATP. Esses sinais foram obtidos para curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos, com variação do fluxo remanescente no núcleo do TC e na carga conectada ao secundário do mesmo.

Os casos analisados nesse trabalho foram simulados para uma taxa de amostragem equivalente a 96 amostras por ciclo, por apresentarem resultados mais satisfatórios. Também foram analisados para uma taxa de 16, 32 e 64 amostras por ciclo. Para uma amostragem de 64 amostras por ciclo, na maioria das vezes os detectores apresentaram atrasos de detecção nos inícios e finais dos intervalos saturados. Para 32 amostras por

ciclo as detecções tiveram resultados ainda piores, pois além de não serem detectadas saturações relevantes os métodos apresentaram atrasos de detecção dos inícios e fins dos intervalos distorcidos. Já para 16 amostras por ciclo como esperado, os métodos apresentam os piores resultados, sendo que foram detectados intervalos de saturação de forma errônea e desnecessária. Desta forma, optou-se pela avaliação das metodologias, para 96 amostras por ciclo.

Com relação às técnicas de detecção, destaca-se o desempenho da proposta fundamentada na Morfologia Matemática, que obteve maior precisão na detecção dos intervalos de saturação. A menor precisão foi para a técnica fundamentada na terceira Funções-Diferença, que apresentou mais atraso na detecção dos inícios dos trechos distorcidos por saturação.

Como o desempenho da técnica de correção é dependente da precisão dos detectores, a metodologia de correção fundamentada em Mínimos Quadrados apresentou comportamentos variados com relação ao erro transitório percentual da compensação. Contudo, verificou-se que a mesma apresentou erros relativamente baixos durante a compensação, garantindo grande melhora a qualidade dos sinais distorcidos.

Sendo assim, vale destacar o bom desempenho do método de correção por Mínimos Quadrados, quando associado à metodologia de detecção fundamentada na Morfologia Matemática. Essa associação apresentou erros transitórios relativamente baixos para todos os casos analisados.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Algumas sugestões para posteriores estudos seguem-se:

- Fazer a comparação entre outras metodologias de detecção;
- Fazer a comparação entre metodologias de correção;
- Desenvolvimento de novas metodologias para a detecção e correção dos intervalos distorcidos por saturação;
- Avaliação do desempenho das metodologias em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DASHTI, H.; PASAND, M. S. & DAVARPANAH, M., **Current Transformer Saturation Detectors for Busbar Differential Protection**. Proceedings of the 42nd International Universities Power Engineering Conference, pp. 338-343, Brighton, UK, Setembro 2007
- DUAILIB, P. Subestações: Tipos, Equipamentos e proteção. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Novembro 1999.
- EL-NAGGAR, K. M. & GILANY, M. I., **A Discrete Dynamic Filter for Detecting and Compensating CT Saturation**. Electric Power Systems Research, 2007.
- GUERRA, F. C. F.; ARAÚJO, L. L.; MEDEIROS, C. D. L., **Correção Numérica de Correntes Secundárias Distorcidas em Transformadores de Corrente**. Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2009.
- 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, Janeiro 2010.
- IEEE Std C37.110-2007. **IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes**. Maio 2008.
- KANG, Y. C., OK, S. H., KANG, S. H. & CROSSLEY, P. A. **Design and Evaluation of an Algorithm for Detecting Current Transformer Saturation**. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution. Vol. 151, Janeiro 2004.
- KEZUNOVIC, M.; KOJOVIC, Lj.; ABUR, A. et al., **Experimental Evaluation of MTP-Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 9, Janeiro 1994.
- KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de potência**. Editora da UFSC, Volume 1, 1^a Edição, 1999.
- LI, F., LI, Y. & AGGARWAL, R. K. **Combined Wavelet Transform and Regression Technique for Secondary Current Compensation of Current Compensation of Current Transformers**. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution. Vol. 149, Junho 2002.

LU, Z., SMITH, J. S. & WU, Q. H. **Morphological Lifting Scheme for Current Transformer Saturation Detection and Compensation.** IEEE Transactions on Circuits and Systems. Vol. 55, Novembro 2008.

SANTOS, E. M. **Métodos para Correção das Distorções da Forma de Onda Secundária Causada Pela Saturação de Transformadores de Corrente para Serviço de Proteção.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), fevereiro 2011.

MONARO, R. M., SILVA, R. C. S., VIEIRA JUNIOR, J. C. M. & COURRY, D. V. **Deteção e Correção de Sinais de Transformadores de Corrente Distorcidos pela saturação Através de redes Neurais Artificiais.** XVIII Congresso Brasileiro de Automática. Setembro 2010.

MOONEY, P. E. J. **Distance Element Performance Under Conditions of CT Saturation.** Proceedings of the 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers. Vol. 1, Abril 2008.

NBR 6856- **Transformador de Corrente.** ABNT, Abril 1992.

PAN, J., Vu, K. & HU, Y. **An Efficient Compensation Algorithm for Current Transformer Saturation Effects.** IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 19, Outubro 2004.

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. Março 2008.

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.

VILLAMAGNA, N. & CROSSLEY, P. A., **A CT Saturation Detection Algorithm Using Symmetrical Components for Current Differential Protection.** IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 21, Janeiro 2006.

WISZNIEWSKI A., REBIZANT, W. & SCHIEL, L. **Correction of Current Transformer Transient Performance.** IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 23, Abril 2008.

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, Outubro 1990.

YU, C. S.; WU Z. S. & JIANG, J. A., **An Adaptive Mimic Filter-Based Algorithm for the Detections of CT Saturations.** Proceedings of the 2009 IEEE Power Energy Society General Meeting, pp. 1-6, Julho 2009.

ANEXOS

ANEXO 1

Sistema Teste Modelado no EMTP – ATP para Obtenção dos Sinais de Corrente

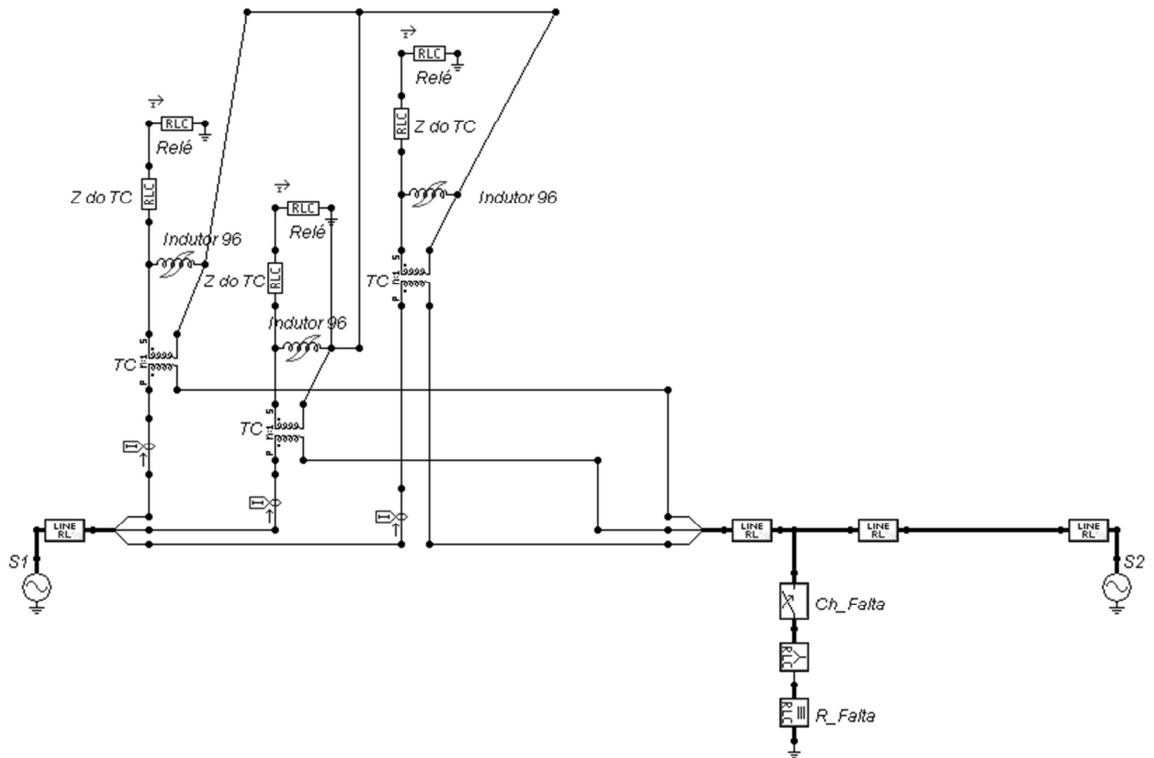


Figura 51 - Sistema Teste

Parâmetros do Sistema

- Linha de Transmissão:
 - Comprimento de 100 km;
 - Impedância de sequência zero de $Z_{L0} = 0,1841 + j1,2258 \Omega/\text{km}$;
 - Impedância de sequência positiva de $Z_{L1} = 0,041 + j0,3878 \Omega/\text{km}$.
- Gerador:
 - Frequência do sistema igual a 60 Hz;
 - $S_A = S_B = 190 \text{KV}$, defasados em 30° ;
 - Impedância de sequência zero de $Z_{S0} = 3,681 + j24,515 \Omega/\text{km}$;
 - Impedância de sequência positiva de $Z_{S1} = 0,819 + j7,757 \Omega/\text{km}$.
- Transformador de Corrente:
 - TC C400 com relação de transformação de 2000/5;

- Resistência secundária de $0,5 \Omega$;
- Indutância secundária de $0,8 \Omega \text{ mH}$;
- Fluxo remanescente variando em 0%, 25%, 50% e 80%.
- Relé:
 - Simulado com carga de 4Ω e 10Ω ;
 - Frequência de amostragem de 5760 HZ (96 amostras/ciclo).

ANEXO 2

Código em Matlab® da Metodologia de Detecção Fundamentada nas Funções-Diferença

```
RTC=2000/5; % Relação de Transformação do TC
ac=96; % Amostras por Ciclo
dt=(1/60)/ac; % Tempo entre Cada Amostra
a=round(dt*10^6); % Passo da Reamostragem
Isat=Isat(1:a:size(Isat,1)/2); % Corrente Secundária
Insat=Insat(1:a:size(Insat,1)/2)/RTC; % Corrente Primária
t=t(1:a:size(t,1)/2); % Linha de Tempo
b=2; % Inicialização do Contador
Ifmax=max(Insat);
Detector(b,1)=0;
Th(1:size(Isat,1))=4*sqrt(2)*Ifmax*(2*sin(pi/96))^3; % Ajuste
while b<=size(Isat,1)
    del1(b,1)=Isat(b,1)-Isat(b-1,1);
    del2(b,1)=del1(b,1)-del1(b-1,1);
    del3(b,1)=del2(b,1)-del2(b-1,1);
    if abs(del3(b,1))>Th
        Detector(b,1)=1;
    else
        Detector(b,1)=0;
    end
    b=b+1;
end
```

ANEXO 3

Código em Matlab[®] da Metodologia de Detecção Fundamentada na Morfologia Matemática

```
RTC=2000/5; % Relação de Transformação do TC
ac=96; % Amostras por ciclo
dt=(1/60)/ac; % Tempo entre cada amostra
a=round(dt*10^6); % Passo da Reamostragem
fa=round(1/dt); % Frequência de Amostragem
Isat=Isat(1:a:size(Isat,1)/2); % Corrente Secundária
Insat=Insat(1:a:size(Insat,1)/2)/RTC; % Corrente Primária
t=t(1:a:size(t,1)/2); % Linha de Tempo
b=2; % Inicialização do Contador
k1=cos(2*pi*60*ta); % SE1
k2=cos(3*2*pi*60*ta); % SE1
jan(1,:)=[0 0 0 0 0 Isat(1,1)]; % Janela Móvel de Dados
jan_imp(1,:)=[jan(1,2) jan(1,4) jan(1,6)]; % Janela Ímpar
jan_par(1,:)=[jan(1,1) jan(1,3) jan(1,5) jan(1,7)]; % Janela Par
Th(1:size(Isat,1))=0.02; % Ajuste
c1=2;
for c2=2:size(Isat,1)
    jan(c2,:)=[jan(c2-1,(2:7)) Isat(c1,1)];
    jan_imp(c2,:)=[jan(c2,2) jan(c2,4) jan(c2,6)];
    jan_par(c2,:)=[jan(c2,1) jan(c2,3) jan(c2,5) jan(c2,7)];
    c1=c1+1;

    d1(c2,1)=[jan(c2,3)/k1];
    d2(c2,1)=[jan(c2,1)/k2];
    d(c2,1)=max([d1(c2,1) d2(c2,1)]);
    e1(c2,1)=[jan(c2,5)/k1];
    e2(c2,1)=[jan(c2,7)/k2];
    e(c2,1)=min([e1(c2,1) e2(c2,1)]);
    D(c2,1)=d1(c2,1)+e1(c2,1); % Dilatação com SE1 + Erosão com SE1
    E(c2,1)=d(c2,1)+e(c2,1); % Dilatação com SE2 + Erosão com SE2

    P(c2,1)=(1/4)*(D(c2,1)+E(c2,1));

    Detalhe(c2,1)=jan(c2,4)-P(c2,1);

    if (Detalhe(c2,1))>Th
        Detector(c2,1)=1;
    else
        Detector(c2,1)=0;
    end
end
end
```

ANEXO 4

Código em Matlab[®] da Metodologia de Detecção Fundamentada na Terceira Derivada

```
RTC=2000/5; % Relação de Transformação do TC
ac=96; % Amostras por Ciclo
dt=(1/60)/ac; % Intervalo de Tempo entre Cada Amostra
a=round(dt*10^6); % Passo da Reamostragem
fa=round(1/dt); % Frequência de Amostragem
Isat=Isat(1:a:size(Isat,1)/2); % Corrente Secundária
Insat=Insat(1:a:size(Insat,1)/2)/RTC; % Corrente Primária
t=t(1:a:size(t,1)/2); % Linha de Tempo
n=5; % Inicialização do Contador
Th(1:size(Isat,1))=0.04; % Ajuste Detecção
while n<=size(Isat,1)
    i2e(n,1)=4*Isat(n-1,1)-6*Isat(n-2,1)+4*Isat(n-3,1)-Isat(n-4,1); % Terceira Derivada
    erro(n,1)=i2e(n,1)-Isat(n,1);
    if abs(erro(n,1))>Th
        detector(n,1)=1;
        nn=0;
        while sign((Isat(n-1,1)/8)+(i2e(n,1)/8)+(3*Isat(n,1)/4)+sum(Isat(n+1:n+1+nn,1)))
            ==sign((Isat(n1,1)/8)+(i2e(n,1)/8)+(3*Isat(n,1)/4)+sum(Isat(n+1:n+1+nn+1,1)))
            detector(n+nn,1)=1;
            nn=nn+1;
        end
        n=n+nn+8;
    else
        detector(n,1)=0;
    end
    n=n+1;
end
```

ANEXO 5

Código em Matlab[®] da Metodologia de Correção por Mínimos Quadrados

```
a=2;          % Inicialização do Contador
RTC=2000/5;   % Relação de Transformação do TC
w=2*pi*60/fa; % Frequência Angular
b=1;
for a=2:size(detector,1)
    if detector(a-1,1)==0 && detector(a,1)==1
        m(b,1)=a;
    end
    if detector(a-1,1)==1 && detector(a,1)==0
        n(b,1)=a;
        b=b+1;
    end
end
g=2;
Icomp(1,1)=Insat(1,1);
b=1;
while g<size(detector,1)
    if detector(g,1)==0
        Icomp(g,1)=Insat(g,1);
    end
    if detector(g-1,1)==0 && detector(g,1)==1
        M=[ cos(w*(m(b,1)-10)) sin(w*(m(b,1)-10)) m(b,1)-10 1;...
            cos(w*(m(b,1)-9))  sin(w*(m(b,1)-9))  m(b,1)-9  1;...
            cos(w*(m(b,1)-8))  sin(w*(m(b,1)-8))  m(b,1)-8  1;...
            cos(w*(m(b,1)-7))  sin(w*(m(b,1)-7))  m(b,1)-7  1;...
            cos(w*(m(b,1)-6))  sin(w*(m(b,1)-6))  m(b,1)-6  1;...
            cos(w*(m(b,1)-5))  sin(w*(m(b,1)-5))  m(b,1)-5  1;...
            cos(w*(m(b,1)-4))  sin(w*(m(b,1)-4))  m(b,1)-4  1;...
            cos(w*(m(b,1)-3))  sin(w*(m(b,1)-3))  m(b,1)-3  1;...
            cos(w*(m(b,1)-2))  sin(w*(m(b,1)-2))  m(b,1)-2  1;...
            cos(w*(m(b,1)-1))  sin(w*(m(b,1)-1))  m(b,1)-1  1;...
            cos(w*(n(b,1)))    sin(w*(n(b,1)))    n(b,1)  1;...
            cos(w*(n(b,1)+1)) sin(w*(n(b,1)+1)) n(b,1)+1 1;...
            cos(w*(n(b,1)+2)) sin(w*(n(b,1)+2)) n(b,1)+2 1;...
            cos(w*(n(b,1)+3)) sin(w*(n(b,1)+3)) n(b,1)+3 1;...
            cos(w*(n(b,1)+4)) sin(w*(n(b,1)+4)) n(b,1)+4 1;...
            cos(w*(n(b,1)+5)) sin(w*(n(b,1)+5)) n(b,1)+5 1 ];
        I= [Insat (m(b,1)-10:m(b,1)-1,1);Insat(n(b,1):n(b,1)+5,1)];
        P=inv(M*M)*M*I;
        for c=m(b,1):n(b,1)
            Icomp(c,1)=P(1,1)*cos(w*c)+P(2,1)*sin(w*c)+P(4,1)+P(3,1)*c;
        end
        g=c;
        b=b+1;
    end
    g=g+1;
end
```