

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MÉTODOS PARA CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES DA  
FORMA DE ONDA SECUNDÁRIA CAUSADAS PELA  
SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE  
CORRENTE PARA SERVIÇO DE PROTEÇÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Eduardo Machado dos Santos**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2011**

**MÉTODOS PARA CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES DA  
FORMA DE ONDA SECUNDÁRIA CAUSADAS PELA  
SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE  
CORRENTE PARA SERVIÇO DE PROTEÇÃO**

**por**

**Eduardo Machado dos Santos**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, **Área de Concentração em Processamento de Energia**,  
da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),  
como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica**

**Orientador: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.**

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**MÉTODOS PARA CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES DA  
FORMA DE ONDA SECUNDÁRIA CAUSADAS PELA  
SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE  
PARA SERVIÇO DE PROTEÇÃO**

elaborada por

**Eduardo Machado dos Santos**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
**Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng. (UFSM)**

  
\_\_\_\_\_  
**Ubiratan Holanda Bezerra, Dr. Eng. (UFPA)**

  
\_\_\_\_\_  
**Luciane Neves Canha, Dra. Eng. (UFSM)**

Santa Maria, 18 de Fevereiro de 2011.

---

© 2011

Todos os direitos autorais reservados a Eduardo Machado dos Santos. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor. Endereço: Rua João Goulart, 535/202, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, 97105-220.

Fone (0xx)55 3223-0103; End. Eletr.: [eduardosantosufsm@gmail.com](mailto:eduardosantosufsm@gmail.com)

---

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Ghendy Cardoso Junior pelos conhecimentos transmitidos durante a orientação deste trabalho, bem como pela sua amizade e determinação inspiradoras.

Aos professores, colaboradores e colegas do CEEMA pela agradável convivência durante o desenvolvimento do trabalho e pela amizade concebida ao longo destes dois anos.

Aos Professores Ubiratan Holanda Bezerra e Luciane Neves Canha, membros da Comissão Examinadora, pelas valiosas sugestões.

À CAPES, pelo suporte financeiro e à Universidade Federal de Santa Maria por toda minha formação desde os tempos da graduação.

Agradeço a todos os meus familiares, em especial a meus pais, Ener e Maria, a quem dedico este trabalho. Um agradecimento especial a minha madrinha Carmen, principal responsável por minha alfabetização durante a infância.

A todos os demais amigos que torceram por mim mesmo sem muita convivência nestes últimos anos.

A Deus por tudo.

# RESUMO

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria

## MÉTODOS PARA CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES DA FORMA DE ONDA SECUNDÁRIA CAUSADAS PELA SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE PARA SERVIÇO DE PROTEÇÃO

AUTOR: EDUARDO MACHADO DOS SANTOS

ORIENTADOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR, Dr. Eng.

**Data e Local da Defesa: Santa Maria, 18 de Fevereiro de 2011.**

Este trabalho visa avaliar o desempenho de alguns métodos para detecção e correção dos trechos distorcidos da forma de onda dos sinais de corrente secundária, que ocorrem em virtude da saturação do núcleo dos transformadores de corrente. Tais métodos são apresentados didaticamente, divididos entre técnicas existentes na literatura especializada e novas propostas. Envolvendo variadas ferramentas matemáticas, as metodologias de correção e detecção foram combinadas para análise de casos. Simulações computacionais de curtos-circuitos foram realizadas para a obtenção dos sinais da corrente secundária distorcida por saturação. Os métodos de detecção foram avaliados em termos da capacidade de reconhecimento dos intervalos de saturação e velocidade de resposta. Além disso, as técnicas de correção foram avaliadas em termos da precisão da compensação e do tempo de processamento. Cálculos de erro transitório e a utilização de um filtro de Fourier de ciclo completo foram a base para a análise qualitativa do desempenho das técnicas de correção. Em cada caso analisado, diferentes desempenhos foram verificados. Observou-se que diferenças nos instantes de detecção dos trechos distorcidos propiciam diferentes margens de erro às metodologias de correção, que são associadas aos detectores de saturação. Nesse contexto, uma das técnicas propostas para detecção dos trechos distorcidos apresentou boa precisão, garantindo que uma das metodologias de compensação, a qual foi associada, obtivesse erros relativamente baixos para todos os casos analisados. Também, verificou-se que as metodologias fundamentadas em Mínimos Quadrados possuem boa precisão durante a correção dos sinais distorcidos por saturação.

Palavras-chave: Correção; Detecção; Forma de Onda Distorcida; Intervalos de Saturação; Proteção de Sistemas Elétricos de Potência; Transformadores de Corrente.

# ABSTRACT

Master of Science Dissertation

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria

## **METHODS FOR CORRECTION OF SECONDARY WAVEFORM DISTORTIONS CAUSED BY SATURATION OF CURRENT TRANSFORMERS FOR PROTECTIVE RELAYING PURPOSES**

AUTHOR: EDUARDO MACHADO DOS SANTOS

ADVISOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR, Dr. Eng.

**Santa Maria, February 18, 2011.**

This work aims to evaluate the performance of some methods used to detect and correct the distorted portions of the secondary current signal waveform, which occur due to the core saturation of current transformers. Such methods are presented didactically divided among techniques existing in the specialized literature and new methodologies proposed. Involving various mathematical tools, methods of correction and detection were combined for the analyzed cases. Computer simulations of faults were made to obtain secondary current signals distorted by saturation, allowing the evaluation of these methodologies. The detection methods were evaluated in terms of the ability to identify saturation intervals and speed response. Moreover, the correction techniques were evaluated in terms of compensation accuracy and their processing time. Transient error calculations and the use of a full cycle Fourier filter were the basis for the qualitative analysis of the correction techniques performance. In each case analyzed, different performances were verified for the combinations tested. It was found that differences in detection time instants of the distorted portions provide different rates of error to the methodologies that are associated with saturation detectors. In this context, one of the techniques proposed for detection of distorted sections showed good precision, ensuring low errors for one of the associated correction methodologies in all the analyzed cases. Also, it was found that methods based on Least Squares have good accuracy for the correction of signals distorted by saturation.

Keywords: Correction; Detection; Distorted Waveform; Electric Power Systems Protection; Saturation Intervals; Current Transformer.

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	1
1.3 MOTIVAÇÃO	2
1.4 ESTADO-DA-ARTE	2
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
<b>2. FUNDAMENTOS DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE</b>	<b>7</b>
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	7
2.2 MODELAGEM DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE	7
2.2.1 <i>Transformador de Corrente</i>	7
2.2.2 <i>Circuito Equivalente do Transformador de Corrente</i>	8
2.2.3 <i>Fator de Sobrecorrente (F.S.)</i>	9
2.2.4 <i>Característica de Excitação do TC</i>	10
2.2.5 <i>Ponto de Joelho da Curva de Excitação (“knee-point”)</i>	11
2.2.6 <i>Classificação dos TCs quanto à Exatidão</i>	12
2.2.7 <i>Cargas Padrão para TCs</i>	14
2.2.8 <i>Tipos Construtivos de Transformadores de Corrente</i>	15
2.3 ESPECIFICAÇÃO DE TCS QUANTO A RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO	16
2.3.1 <i>Critério da Corrente Nominal de Carga do Alimentador</i>	16
2.3.2 <i>Critério do Curto-Circuito</i>	16
2.4 SATURAÇÃO DE TCS	17
2.4.1 <i>Características Dinâmicas</i>	18
2.4.2 <i>Os Efeitos do Fluxo Remanescente</i>	22
2.4.3 <i>Efeitos da Saturação Sobre os Principais Tipos de Proteção</i>	23
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	24
<b>3. TÉCNICAS PARA DETECÇÃO E CORREÇÃO DOS INTERVALOS DISTORCIDOS PELA SATURAÇÃO</b>	<b>25</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	25
3.2 TÉCNICAS DE DETECÇÃO	25
3.2.1 <i>Detecção Utilizando Transformada Wavelet Discreta</i>	26
3.2.2 <i>Detecção da Saturação a Partir das Funções-Diferença do Sinal Analisado</i>	28
3.2.3 <i>Detecção por Meio de Morfologia Matemática</i>	29
3.3 TÉCNICAS DE DETECÇÃO PROPOSTAS NA DISSERTAÇÃO	32
3.3.1 <i>Detecção da Saturação Através do Ângulo Formado Entre as Diferenças do Sinal de Corrente</i>	32



3.3.2	<i>Detecção da Saturação Através da Terceira Derivada</i>	35
3.3.3	<i>Detecção da Saturação Através da Distância Entre Pontos Consecutivos nos Planos Formados por Amostras de Corrente Secundária e suas Funções-Diferença</i>	37
3.4	TÉCNICAS DE CORREÇÃO	42
3.4.1	<i>Correção dos Intervalos de Saturação por Mínimos Quadrados</i>	42
3.4.2	<i>Correção dos Intervalos de Saturação Utilizando Técnica de Regressão</i>	45
3.4.3	<i>Correção dos Intervalos de Saturação por Corrente de Magnetização</i>	48
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>52</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	52
4.2	SISTEMA TESTE	52
4.3	CASOS TESTADOS	53
4.3.1	<i>Falta Monofásica: Carga Resistiva de 4 <math>\Omega</math> e 0% de Fluxo Remanescente</i>	53
4.3.2	<i>Falta Monofásica: Carga Resistiva de 4 <math>\Omega</math> e 80% de Fluxo Remanescente</i>	68
4.3.3	<i>Falta Monofásica: Carga de 4 <math>\Omega</math>, 0 e 80% de Fluxo Remanescente, Fator de Potência Indutivo da Carga do TC</i>	81
4.3.4	<i>Testes Complementares I: Falta Monofásica, Carga Resistiva de 10 <math>\Omega</math>, Fluxo Remanescente de 0% e 80%</i>	95
4.3.5	<i>Testes Complementares II: Falta Trifásica, Carga de 4 <math>\Omega</math>, Fluxo Remanescente de 0% e 80%</i>	103
4.4	AVALIAÇÃO DO TEMPO DE PROCESSAMENTO DAS METODOLOGIAS	110
4.5	RESUMO DOS RESULTADOS	112
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b>	<b>118</b>
5.1	CONCLUSÕES	118
5.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	119
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>120</b>

# *Capítulo 1*

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 Considerações Gerais**

Os transformadores de corrente (TCs) são fundamentais para o funcionamento adequado do sistema de proteção utilizado nos sistemas elétricos de potência, uma vez que a sua função é replicar as altas correntes primárias em menor escala no secundário, propiciando assim acesso aos sinais de corrente da rede.

Esses transformadores, como qualquer outro com núcleo ferromagnético, estão sujeitos a um fenômeno conhecido como saturação, que 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 também são favoráveis a saturação. Um TC com núcleo saturado distorce a forma de onda no secundário, podendo causar a má atuação dos relés a ele conectados.

### **1.2 Objetivos do Trabalho**

Esta dissertação tem como objetivo geral abordar os assuntos relacionados exclusivamente à saturação dos transformadores de corrente destinados à proteção, ou seja, propor novas metodologias para detecção dos intervalos de saturação, além de apresentar aplicações das técnicas para correção da forma de onda secundária do TC, distorcida em virtude da saturação.

Como objetivo específico cita-se:

- Descrever algumas das diversas técnicas de detecção e correção existentes na literatura especializada, de maneira a facilitar suas implementações;
- Avaliar qualitativamente os métodos de modo a destacar as vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas analisadas;
- Verificar o desempenho dos métodos por meio de simulações computacionais.

### 1.3 Motivação

O fenômeno da saturação dos transformadores de corrente é motivo de pesquisa desde os anos 20. Desde então, muitos trabalhos foram publicados discutindo soluções para os problemas causados por esse fenômeno, relativos à proteção dos sistemas elétricos de potência. A partir dos anos 70, as pesquisas nessa área foram intensificadas e suas causas passaram a ser amplamente difundidas em trabalhos como os de CONNER *et al.* (1975), VANDERLECK *et al.* (1977) e POWELL (1979).

A partir dos anos 90, com o grande avanço da tecnologia computacional, pesquisas com relação ao fenômeno da saturação e suas conseqüências sobre os diversos tipos de proteção foram realizadas. Exemplos dessas pesquisas são encontrados em ZOCHOLL & SMAHA (1992), KEZUNOVIC *et al.* (1994), BRIDGER & BURSE (1997), STRINGER (1997), ZOCHOLL & BENMOUYAL (1997), TZIOUVARAS *et al.* (2000), PASCUAL & RAPALLINI (2001), CAMARENA (2004), WU *et al.* (2007) e SAWKO (2008).

Desde essa época e graças ao advento dos relés numéricos, técnicas para detecção da saturação e correção das distorções causadas por esse fenômeno foram difundidas na literatura especializada. Entretanto, nenhuma dessas metodologias mostrou-se eficaz para todas as situações possíveis. Devido às considerações feitas ou à sensibilidade e complexidade das ferramentas matemáticas e computacionais envolvidas, muitas restrições podem ser verificadas.

Diante disso, encontrou-se motivação para realização deste trabalho, onde busca-se desenvolver metodologias robustas e de fácil implementação, que sejam capazes de amenizar os efeitos da saturação dos transformadores de corrente. Dessa forma, espera-se aprimorar o desempenho dos relés em situações que envolvam a saturação dos TCs, aumentando a disponibilidade do sistema elétrico, por meio de uma melhoria na confiabilidade dos esquemas de proteção.

### 1.4 Estado-da-arte

Com o objetivo de melhorar o desempenho dos esquemas de proteção diante de situações que envolvam a saturação dos transformadores de corrente, diversas metodologias foram propostas para amenizar as conseqüências desse fenômeno. Nos anos 70, alguns circuitos para evitar a saturação dos TCs foram propostos. Entre estes se destaca o circuito

proposto por BRADLEY *et al.* (1978), que injetava uma corrente exponencial de magnitude controlada ao terminal secundário do TC, de modo a reduzir a amplitude da componente exponencial do sinal secundário original, prevenindo a saturação do transformador.

Além disso, MASSON (1979) propôs um circuito que inseria uma elevada resistência em série com a carga do TC, estabelecendo um controle dinâmico da magnitude do fluxo no núcleo desse transformador. Essas duas propostas consideravam as componentes unidirecionais exponencialmente decrescentes das correntes de curto-circuito como principais agentes causadores da saturação.

A partir do final dos anos 80, com os avanços tecnológicos dos microprocessadores, metodologias para detecção e correção passaram a ser pesquisadas. WISZNIEWSKI & SZAFRAN (1989) propuseram uma técnica fundamentada na determinação do instante em que ocorria a primeira saturação do TC e posterior estimação dos valores de impedância sem a correção dos intervalos distorcidos. Ainda, YANG *et al.* (1990) desenvolveram um detector de saturação fundamentado na diferença entre amostras consecutivas do sinal de corrente secundária.

O crescente desenvolvimento tecnológico dos microprocessadores permitiu o desenvolvimento de técnicas mais robustas ao longo dos anos, que utilizam ferramentas matemáticas de maior complexidade. HOSEMANN & STEIGERWALD (1993) desenvolveram um filtro modal para detecção da saturação, a ser utilizado em relés digitais para proteção diferencial.

KANG *et al.* (1997) propuseram uma metodologia de correção fundamentada na adição da corrente de magnetização ao valor de corrente secundária correspondente, pertencente ao respectivo trecho distorcido a ser corrigido. Também, KANG *et al.* (2001) desenvolveram uma técnica para detecção dos intervalos de saturação fundamentada nas funções-diferença do sinal de corrente amostrado. Uma metodologia para ajuste dessa técnica de detecção é apresentada em KANG *et al.* (2004a). Essas técnicas de detecção e correção foram combinadas em KANG *et al.* (2004b).

Três algoritmos para detecção dos intervalos de saturação foram propostos em KASZTENNY *et al.* (1997). Um desses algoritmos estima pontos do sinal analisado através da derivada de segunda ordem e posterior comparação com o valor correspondente amostrado. Incrementos no erro dessa estimação caracterizam os intervalos de saturação. O segundo algoritmo proposto nesse trabalho utiliza filtros que calculam a média e a mediana para uma janela de dados. Um sinal de erro é gerado a partir da diferença entre esses parâmetros,

apresentando incrementos significativos nos instantes que caracterizam início e fim dos trechos distorcidos por saturação. A terceira proposta sugere a utilização de uma Rede Neural Artificial para detecção dos referidos intervalos.

LI *et al.* (2002) propuseram a utilização da *Transformada Wavelet Discreta* para a detecção dos intervalos de saturação. Também propuseram uma técnica de regressão para correção desses intervalos.

Uma metodologia para correção dos intervalos de saturação fundamentada no Método de Ajuste de Curvas por Mínimos Quadrados é proposta por PAN *et al.* (2004). Outra metodologia de correção por Mínimos Quadrados é proposta por EL-NAGGAR & GILANY (2007), que também propõem um filtro de Kalman para detecção dos trechos saturados.

REBIZANT *et al.* (2008) propuseram uma metodologia de compensação dos trechos distorcidos baseada na estimação da constante de tempo para saturação do TC. Outra metodologia de detecção e correção dos intervalos distorcidos por saturação foi proposta por WISZNIEWSKI *et al.* (2008). Tal metodologia estima pontos futuros do sinal por meio das derivadas de primeira, segunda ou terceira ordem. Os pontos estimados são comparados com os valores amostrados do sinal de corrente. O erro da estimação determina a detecção dos intervalos de saturação. A correção dos sinais é feita através de cálculos envolvendo alguns desses valores estimados.

HONG & CHIAN (2008) propuseram uma metodologia de detecção que utiliza a transformada wavelet, sendo a correção realizada com o auxílio de inteligência artificial (Lógica Fuzzy e Redes Neurais Artificiais). Além disso, LU *et al.* (2008) propuseram um detector de saturação fundamentado em operadores da Morfologia Matemática. Também propuseram uma metodologia de correção pela adição da corrente de magnetização, estimada para cada ponto do trecho distorcido.

Um método adaptativo, para obtenção da impedância da linha de transmissão por meio de um filtro mímico, foi utilizado como detector de saturação e proposto por YU *et al.* (2009). Nessa técnica, as variações de impedância determinam os intervalos de saturação. Também, uma metodologia de detecção a partir da análise da razão entre a segunda harmônica e a componente fundamental do sinal de corrente, somada à análise da segunda função-diferença do sinal, foi proposta por STACHEL & SCHEGNER (2009). Nesse trabalho, também foi proposta uma técnica para correção dos intervalos de saturação fundamentada em Mínimos Quadrados.

Mais recentemente, HONG & WEI (2010) propuseram uma metodologia de correção que combina regressão não-linear e lógica Fuzzy, associada a um detector fundamentado na *Transformada Wavelet Discreta*. No mesmo ano, OZGONENEL *et al.* (2010) desenvolveram uma técnica de correção baseada na Transformada Rápida de Fourier. Também, YU (2010) propôs um detector de saturação a partir da análise da componente exponencialmente declinante das correntes de curto-circuito. Nesse trabalho, também foi proposta uma metodologia de correção dos trechos distorcidos, que utiliza amostras de corrente e fasores obtidos durante o último trecho não saturado do sinal. Outra metodologia de correção dos efeitos da saturação foi proposta SHI *et al.* (2010), onde as características de saturação do TC são representadas por um modelo de regressão não-linear parcial.

Metodologias que utilizam Redes Neurais Artificiais tanto para detecção, quanto para correção dos efeitos da saturação, foram propostas por YU *et al.* (1999), CUMMINS *et al.* (2000), SAHA *et al.* (2001), LEPRETTRE & BASTARD (2001), YU *et al.* (2001), ZADEH & PASAND (2004), SEGATTO & COURY (2006) e MONARO *et al.* (2010). Também, um algoritmo genético para otimização das topologias de Redes Neurais Artificiais, destinadas a detecção dos intervalos de saturação, foi proposto por REBIZANT & BEJMERT (2007).

Além de metodologias para detecção e correção dos efeitos da saturação, técnicas para adaptação de relés diferenciais durante os intervalos em que esse fenômeno ocorre foram propostas em REBIZANT *et al.* (2004) e VILLAMAGNA & CROSSLEY (2006).

## **1.5 Estrutura da Dissertação**

No Capítulo 2, são abordados os fundamentos dos transformadores de corrente, bem como o fenômeno da saturação, suas causas e conseqüências com relação à proteção dos sistemas elétricos de potência. Este capítulo apresenta descrições detalhadas sobre as principais características dos TCs. Além disso, são apresentados aspectos para especificação desses equipamentos e um embasamento teórico detalhado sobre o fenômeno da saturação, incluindo suas causas e conseqüências sobre o comportamento de relés de proteção.

No Capítulo 3, os métodos de detecção e correção dos efeitos da saturação analisados nesse estudo são descritos separadamente. As metodologias apresentadas para essas funções são descritas de forma didática, facilitando o entendimento das mesmas. Também, são apresentadas as associações entre técnicas de detecção e correção analisadas durante os testes.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por cada metodologia analisada para os diferentes casos estudados, bem como a discussão referente a esses resultados. Sinais de corrente secundária foram obtidos por meio de simulação computacional de faltas, correspondendo a cada situação analisada. A partir desses sinais, foi verificado o desempenho das metodologias em termos da capacidade de detecção dos trechos distorcidos por saturação, bem como em termos da precisão da compensação desses trechos e do tempo de processamento de cada técnica avaliada.

Para finalizar, no Capítulo 5, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

## *Capítulo 2*

# **FUNDAMENTOS DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE**

### **2.1 Considerações Gerais**

O entendimento do fenômeno da saturação é essencial para o desenvolvimento de metodologias capazes de detectar e corrigir os intervalos distorcidos dos sinais de corrente secundária. Logo, o foco desse capítulo é apresentar os conceitos fundamentais dos TCs, incluindo as causas e as conseqüências de sua saturação com relação à proteção dos sistemas elétricos de potência. Critérios para modelagem e especificação de TCs são apresentados neste capítulo, bem como alternativas para amenizar ou até evitar a sua saturação.

### **2.2 Modelagem do Transformador de Corrente**

#### **2.2.1 Transformador de Corrente**

Um transformador de corrente tem basicamente três finalidades:

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

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

Para padronizar os equipamentos de medição e proteção, o TC fornece em seu secundário uma corrente nominal de 5 A (Padrões ANSI e ABNT). Na Europa, a corrente secundária nominal é normatizada em 1 A.



A Razão de Transformação de um TC (RTC) pode ser expressa pela razão entre as espiras dos enrolamentos secundário e primário, conforme (2.1).

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

A RTC pode ser expressa também em termos das correntes nominais do primário e do secundário do TC de acordo com (2.2).

$$RTC = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \times \frac{5}{5} = \frac{I_{1nom}}{5} \quad (2.2)$$

Segundo o padrão ANSI, os valores de RTC podem ser de 10:5, 15:5, 25:5, 40:5, 50:5, 75:5, 100:5, 200:5, 300:5, 400:5, 600:5, 800:5, 1200:5, 1500:5, 2000:5, 3000:5, 4000:5, 5000:5, 6000:5, 8000:5 e 12000:5 A (IEEE Std C57.13-1993). Pela ABNT, os valores de RTC podem ser de 5:5, 10:5, 15:5, 20:5, 25:5, 30:5, 40:5, 50:5, 60:5, 75:5, 100:5, 125:5, 150:5, 200:5, 250:5, 300:5, 400:5, 500:5, 600:5, 800:5, 1000:5, 1200:5, 1500:5, 2000:5, 3000:5, 4000:5, 5000:5, 6000:5 e 8000:5 A (KINDERMANN, 1999).

### 2.2.2 Circuito Equivalente do Transformador de Corrente

Como a ocorrência de transitórios nos sistemas de potência altera o comportamento dos TCs, ambas as condições de regime permanente e transitório devem ser consideradas quando se examinam as características de um TC. A Figura 2.1 mostra o circuito equivalente de um TC conectado a uma carga. A impedância de dispersão primária e a parte reativa do terminal secundário podem ser desconsideradas, uma vez que não afetam substancialmente o seu desempenho (IEEE Std C37.110-2007).

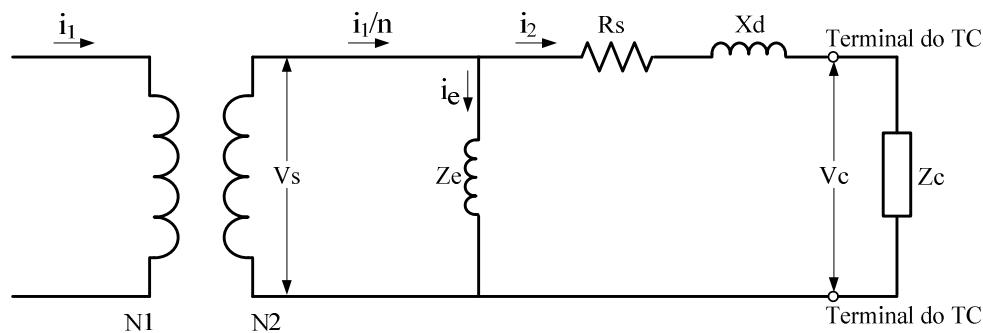


Figura 2.1 – Circuito Equivalente do TC e carga conectada.

Na Figura 2.1,  $i_1$  representa a corrente primária,  $V_s$  a tensão secundária de excitação,  $i_e$  a corrente de excitação,  $i_1/n$  a corrente secundária total,  $Z_e$  a impedância do ramo de excitação,  $i_2$  a corrente secundária que flui pela carga,  $R_s$  a resistência do enrolamento secundário,  $X_d$  a reatância de dispersão,  $V_c$  a tensão na carga e  $Z_c$  a impedância da carga.  $N_1$  e  $N_2$  representam o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente.  $N_2/N_1$  é a razão de espiras do TC.

A corrente de excitação  $i_e$  é dada pela Equação 2.3, onde  $i_M$  representa a corrente de magnetização e  $i_{Loss}$  as perdas no núcleo. O valor de  $i_e$  é muito pequeno em condições normais de operação do TC (região linear da curva de magnetização do núcleo) e o erro causado por essa corrente é desprezível. Entretanto, em situações indesejadas como curtos-circuitos, o TC pode entrar na porção não-linear da curva de excitação do núcleo, causando erros consideráveis à transformação como consequência do incremento desproporcional nos valores de  $i_e$ . Esse incremento causa distorções consideráveis na forma de onda do sinal de corrente no secundário do TC. Os erros máximos admitidos para TCs de proteção são de 2,5% e 10%. O valor mais comumente usado é o de 10%.

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

A corrente secundária total é dada por (2.4).

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

Logo, a corrente primária total pode ser obtida por meio da Equação 2.5.

$$i_1 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \times (i_2 + i_e) \quad (2.5)$$

### 2.2.3 Fator de Sobrecorrente (F.S.)

O fator de sobrecorrente (F.S.) do TC é definido como a relação entre a máxima corrente de curto-circuito eficaz que pode passar pelo primário e a corrente primária nominal para que o erro de sua classe seja mantido. O F.S. é dado pela Equação (2.6).

$$F. S. = \frac{I_1^{máx\ cc}}{I_1\ nominal} \quad (2.6)$$

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

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

## 2.2.4 Característica de Excitação do TC

A operação do TC é ilustrada por curvas de excitação, em escala logarítmica, obtidas a partir de testes de campo e geradas por cálculos durante o processo de fabricação. Essas curvas mostram a relação entre a tensão secundária de excitação ( $V_s$ ) e a corrente de excitação do núcleo ( $i_e$ ). A Figura 2.2 mostra um conjunto de curvas para um TC da classe C.

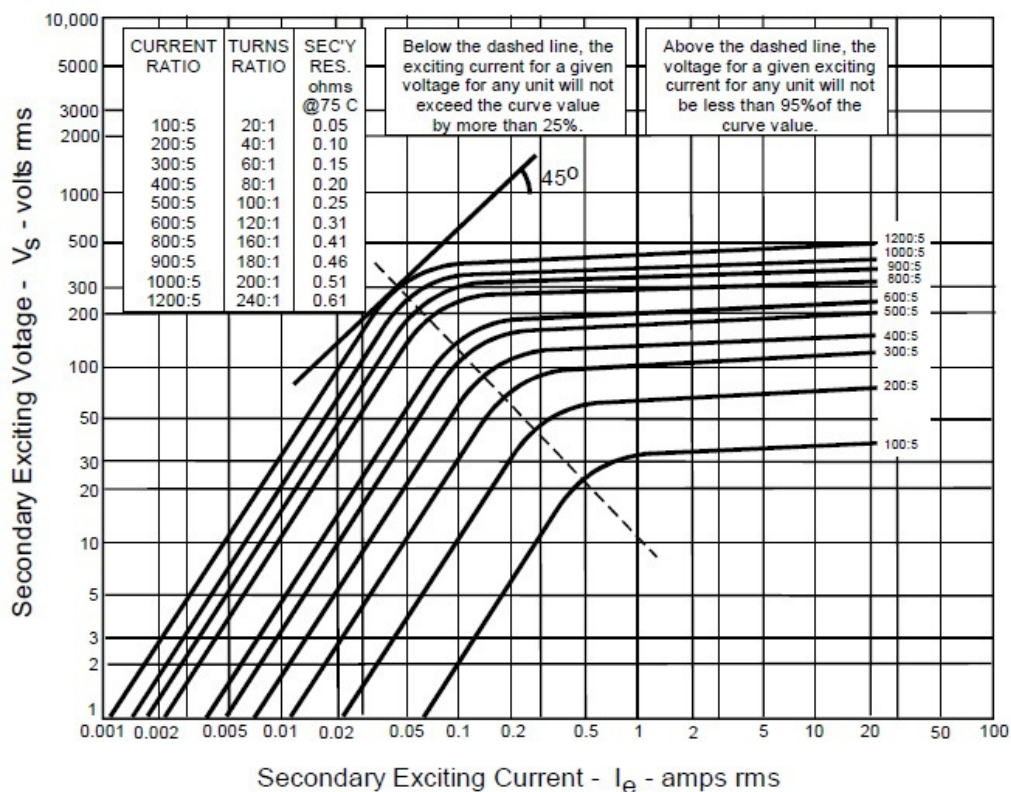


Figura 2.2 – Curvas de excitação típicas para TCs classe C com várias relações de transformação.  
FONTE: IEEE Std C37.110-2007.

Quando a tensão entregue à carga conectada ao secundário do TC é baixa, a corrente de excitação do núcleo também é baixa. Sendo assim, o erro causado por essa corrente não propicia grandes distorções à forma de onda do sinal de corrente secundária.

Entretanto, o fluxo no núcleo do TC aumenta para um incremento da tensão através do enrolamento secundário, causado por elevação de corrente ou de carga. Em algumas situações, o TC irá operar na região onde há um incremento desproporcional na corrente de excitação. Nessa região, o núcleo encontra-se magneticamente saturado e a operação do TC apresenta elevada taxa de erro, causando distorções significativas à forma de onda da corrente secundária.

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

O joelho da curva de excitação é o ponto de máxima permeabilidade magnética do núcleo do transformador (IEEE Std C37.110-2007). Para valores de corrente e tensão inferiores às coordenadas desse ponto, considera-se que o TC opera na região linear da característica de excitação e os erros da transformação são desprezíveis. Entretanto, para valores acima do joelho da curva, o TC opera na região de saturação do núcleo, o que eleva a taxa de erro e provoca distorções na forma de onda da corrente no terminal secundário, conforme referido na Seção 2.2.4.

Embora a curva de saturação tenha um valor do ponto de joelho bem definido, ela não tem um ponto discernível de saturação (ZOCHOLL, 2004). No *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers* (IEEE Std C57.13-1993), o joelho da curva de excitação é definido como o ponto em que a tangente da curva forma um ângulo de 45° com a abscissa. Essa definição é válida para TCs com núcleos sem entreferro e é ilustrada na Figura 2.2. Para núcleos com entreferro esse ângulo deve ser de 30°.

A norma européia, derivada de BS 3938-1973 e também recomendada pela IEC, define o ponto de joelho como o ponto da curva de excitação em que um incremento de 10% na tensão de excitação provoca um aumento de 50% na corrente de excitação. A tangente nesse ponto tem uma inclinação que pode ser determinada com o auxílio da Equação (2.7).

$$\frac{\Delta V_s}{\Delta I_e} = \frac{\log(1 + 0,1)}{\log(1 + 0,5)} = 0,235 \quad (2.7)$$

Nesse ponto, a tangente cresce uma década vertical para 4,25 décadas horizontais, formando um ângulo de 13° com a abscissa. Além disso, a tensão nesse ponto é 20% a 25% maior do que a tensão de joelho obtida pela definição descrita em IEEE C57.13-1993. A definição européia para o ponto de joelho pode ser vista na Figura 2.3.

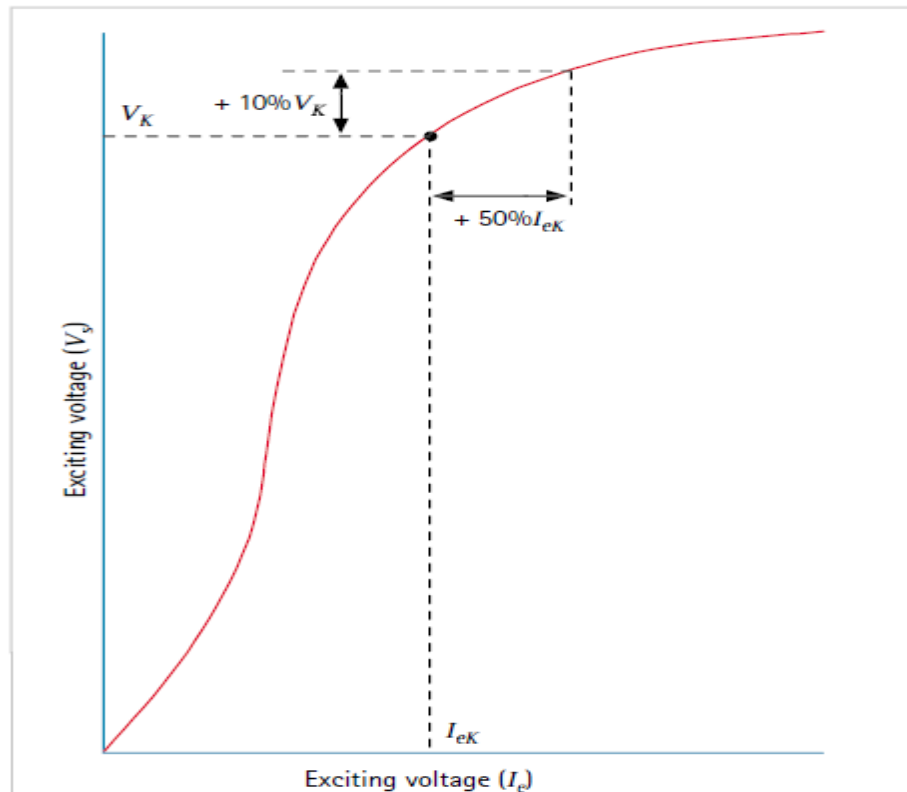


Figura 2.3 – Definição do ponto de joelho segundo a norma européia.  
 FONTE: *Network Protection & Automation Guide*.

Alguns fabricantes utilizam outras definições para o ponto de joelho. Um destes especifica esse ponto como sendo o valor RMS de tensão de excitação que produz um pico de densidade de fluxo equivalente a 1,5 T. Outro fabricante considera o valor de tensão que produz uma corrente de excitação igual à corrente secundária nominal (IEEE Std C37.110-2007).

## 2.2.6 Classificação dos TCs quanto à Exatidão

### 2.2.6.1 Padrão ABNT

A ABNT define a classe de exatidão de um TC com base na máxima potência aparente (VA) consumida pela carga no secundário para uma corrente nominal de 5 A (KINDERMANN, 1999). Ou seja, é a carga máxima que se pode conectar ao secundário do TC, em regime permanente, sem que o erro exceda o maior erro de sua classe para um curto-circuito máximo limitado pelo fator de sobrecorrente.

A nomenclatura, segundo o padrão nacional, se dá conforme o modelo da expressão (2.8).

$$\left. \begin{matrix} \{A\} \\ \{B\} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} \{2,5\} \\ \{10\} \end{matrix} \right\} F \left. \begin{matrix} \{5\} \\ \{10\} \\ \{15\} \\ \{20\} \end{matrix} \right\} C \left. \begin{matrix} \{12,5\} \\ \{25\} \\ \{50\} \\ \{100\} \\ \{200\} \\ \{400\} \\ \{800\} \end{matrix} \right\} \quad (2.8)$$

Em (2.8), 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 5 A.

### 2.2.6.2 Padrão ANSI

Segundo a *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers* (IEEE Std C57.13-1993), a classe de exatidão é determinada por uma letra e a tensão secundária que descreve a performance do TC em regime permanente (classe de tensão). Esse valor é equivalente a tensão entregue a uma carga padrão, conectada ao secundário do TC, para uma corrente equivalente a 20 vezes a corrente nominal, sem exceder 10% de erro na transformação.

A nomenclatura segundo o padrão ANSI segue o modelo da expressão (2.9).

$$\left. \begin{matrix} \{C\} \\ \{K\} \\ \{T\} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} \{10\} \\ \{20\} \\ \{50\} \\ \{100\} \\ \{200\} \\ \{400\} \\ \{800\} \end{matrix} \right\} \quad (2.9)$$

Onde:

- C – Indica que o fluxo de dispersão é desprezível e a característica de excitação pode ser usada diretamente para determinar o desempenho do TC (o erro pode ser calculado). Assume-se que as correntes de carga e de excitação estão em fase e que o enrolamento secundário está distribuído uniformemente (IEEE C37.110-2007).
- K – Mesmo que a classe C, porém a tensão no joelho da curva de excitação deve ser no mínimo 70% do valor nominal da tensão secundária especificada na nomenclatura.

Transformadores dessa classe possuem núcleos maiores do que os correspondentes da classe C.

- T – Indica que o erro deve ser determinado por testes. Possuem o enrolamento primário enrolado. Essa classe de TCs apresenta significativo fluxo de dispersão no núcleo, o que contribui para um erro bastante considerável.

Ainda, a antiga classificação segundo o padrão ANSI era determinada pelo valor de erro, seguido por uma letra designando a reatância do TC e pelo valor indicando a classe de tensão secundária. Isso pode ser visto na expressão (2.10), onde L representa um TC de baixa reatância e H, um de alta reatância. Essa nomenclatura é aplicada somente a TCs antigos, sendo a maioria destes fabricados antes 1954.

$$\left. \begin{matrix} \{2,5\} \\ \{10\} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \{L\} \\ \{H\} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 10 \\ 20 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 400 \\ 800 \end{matrix} \right\} \quad (2.10)$$

### 2.2.7 Cargas Padrão para TCs

Segundo o IEEE Std C57.13-1993, a padronização das cargas dos TCs se dá de acordo com a Tabela 2.1. As associações entre carga e tensão no terminal secundário do TC, para uma corrente de 20 vezes a corrente nominal, são mostradas na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 – Cargas padrão para TCs com enrolamentos secundários de 5A (FONTE: IEEE Std C57.13-1993)

Carga	Designação da Carga	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Impedância (Ω)	VA (para 5 A)	Fator de Potência
TCs para medição	B-0.1	0,09	0,116	0,1	2,5	0,9
	B-0.2	0,18	0,232	0,2	5	0,9
	B-0.5	0,45	0,58	0,5	12,5	0,9
	B-0.9	0,81	1,04	0,9	22,5	0,9
	B-1.8	1,62	2,08	1,8	45	0,9
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 2.2 – Associação entre cargas e TCs de acordo com a classe de tensão (FONTE: IEEE Std C57.13-1993)

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

### 2.2.8 Tipos Construtivos de Transformadores de Corrente

Quanto aos aspectos construtivos, os TCs podem ser classificados de acordo com o modelo de enrolamento primário e com o formato do núcleo (IEEE Std C57.13-1993 e IEEE Std C37.110-2007). Os principais tipos construtivos de TC são:

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

A Figura 2.4 ilustra os principais tipos de TCs destinados à proteção de sistemas elétricos de potência. Mais detalhes podem ser encontrados no IEEE Std C57.13-1993 e no IEEE Std C37.110-2007.



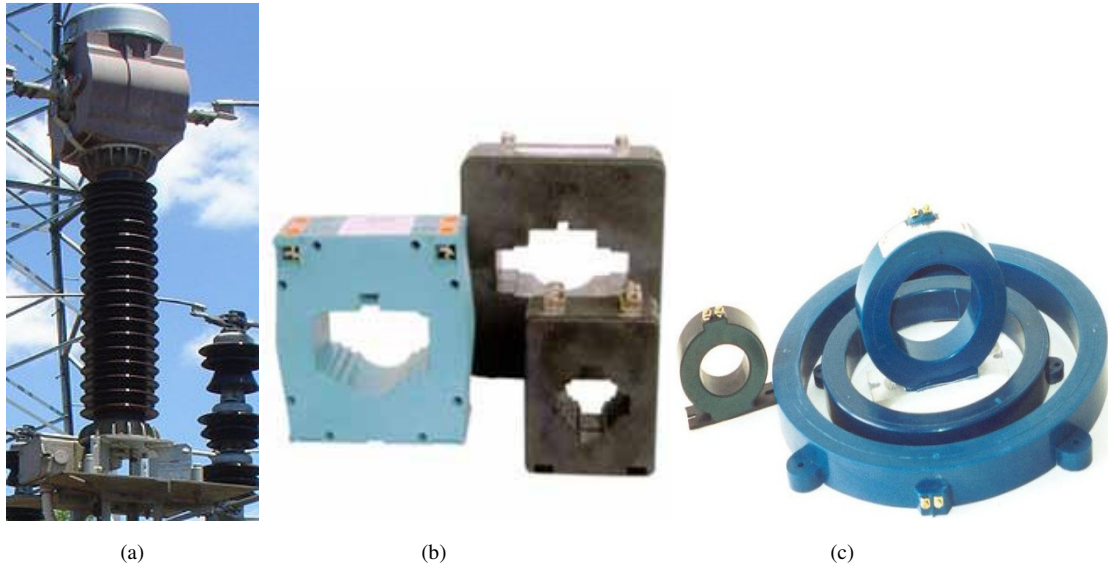


Figura 2.4 – Tipos Construtivos de TCs para proteção. (a) Tipo enrolado. (b) Tipo bucha. (c) Tipo janela.

## 2.3 Especificação de TCs quanto a Relação de Transformação

Para especificar a relação de transformação dos TCs, basicamente, dois critérios devem ser avaliados. O primeiro critério considera a corrente de carga do alimentador. O segundo considera o fator de sobrecorrente. Os dois critérios utilizam valores de corrente simétrica eficaz nos cálculos.

Ambos os critérios devem ser analisados, a fim de garantir que o transformador de corrente opere corretamente, tanto para as correntes de carga quanto para as de curto-circuito, garantindo que o erro máximo da respectiva classe não seja excedido (IEEE C37.110-2007).

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

A relação de transformação do TC deve cobrir a corrente nominal do alimentador, conforme a expressão (2.11). A escolha da RTC por esse critério não é definitiva, uma vez que o critério do curto-circuito também deve ser satisfeito.

$$I_{1\text{ TC}} > I_{\text{Nominal do alimentador}} \quad (2.11)$$

### 2.3.2 Critério do Curto-Circuito

Além de satisfazer a expressão (2.11), a relação de transformação do TC deve satisfazer a condição imposta pelo fator de sobrecorrente. A corrente primária nominal do TC

deverá ser maior ou igual à corrente máxima simétrica de curto-circuito dividida pelo F.S., conforme a expressão (2.12).

$$I_{1\text{ TC}} \geq \frac{I_{\text{CC max}}}{\text{F.S.}} \quad (2.12)$$

## 2.4 Saturação de TCs

Na Figura 2.5 é ilustrado o circuito simplificado de um TC, onde  $i_1/n$  é a corrente secundária total (corrente primária dividida pela relação de transformação),  $i_e$  é a corrente de excitação do núcleo e  $i_2$  é a corrente disponível no terminal secundário, que alimenta a carga  $R$ . O valor de  $i_2$  é dado por (2.13).  $X_m$ ,  $R_m$  e  $Z_m$  representam, respectivamente, a reatância, a resistência e a impedância do ramo de magnetização.

$$i_2 = \frac{i_1}{n} - i_e \quad (2.13)$$

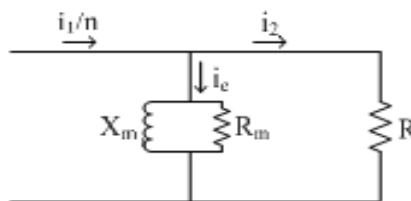


Figura 2.5 – Circuito simplificado do transformador de corrente.

A corrente de excitação está sempre presente, porém seu valor é muito pequeno em condições normais, pois a impedância do ramo de magnetização é grande. Sendo assim, o erro causado devido a  $i_e$  é muito pequeno. Contudo, quando ocorre a saturação magnética do núcleo, o valor de  $Z_m$  cai drasticamente, e a maior parte da corrente  $i_1/n$  passa pelo ramo de magnetização, causando distorção na forma de onda do sinal recebido pela carga do TC. A Figura 2.6 ilustra as formas de onda de um sinal de corrente ideal e de um sinal distorcido pela saturação.

Durante a saturação do TC, a impedância vista por relés de distância ( $Z=V/I$ ) pode ser maior do que o valor esperado, promovendo assim um problema de subalcance neste tipo de proteção (MOONEY, 2008).

No caso dos relés de sobrecorrente, a saturação do TC pode fazer com que a corrente vista pelos relés seja inferior a real, implicando na não operação ou atraso no tempo de operação dos mesmos (KOJOVIC, 2002; EL-AMIN & AL-ABBAS, 2006).

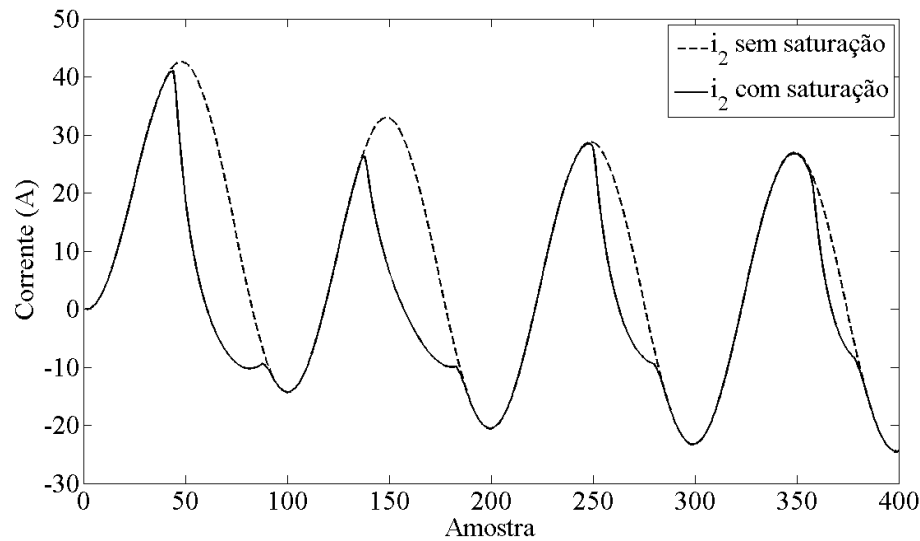


Figura 2.6 – Formas de onda da corrente secundária para um TC saturado e não-saturado.

Além disso, relés diferenciais podem operar indevidamente por influência da saturação dos TCs (REBIZANT *et al.*, 2004).

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

Por esses motivos, vêm sendo estudados métodos que visem detectar os intervalos de saturação dos TCs, para então providenciar a correção dos sinais de corrente distorcidos em virtude desse fenômeno. Assim, garante-se o funcionamento adequado dos esquemas de proteção, aumentando a sua confiabilidade. Algumas dessas metodologias serão discutidas no Capítulo 3.

## 2.4.1 Características Dinâmicas

### 2.4.1.1 Variação do Fluxo com Corrente Primária Assimétrica

A componente exponencial, ou unidirecional, de uma corrente assimétrica causa um grande incremento ao fluxo magnético no núcleo do TC. Quando a assimetria é máxima, o fluxo do TC pode aumentar para  $1+X/R$  vezes o fluxo resultante de um sinal senoidal (sem componente unidirecional), onde  $X$  e  $R$  representam, respectivamente, a reatância e a resistência primária do sistema até o ponto da falta (IEEE C37.110-2007).

As Figuras 2.7 e 2.8 mostram o comportamento do fluxo para uma corrente simétrica e assimétrica. A Figura 2.7 mostra o fluxo resultante para uma corrente primária sem

assimetria. Nessa situação, o núcleo do TC não entra na região saturada de operação e, conseqüentemente, não causa distorções na forma de onda da corrente secundária.

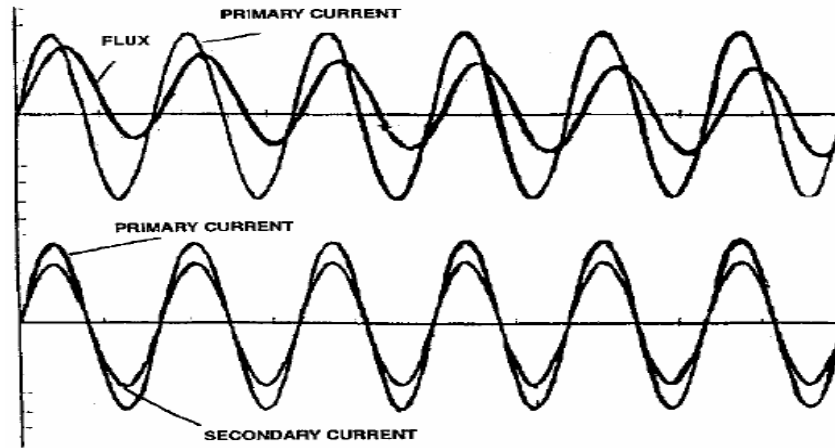


Figura 2.7 – TC não saturado: Relação entre corrente primária e fluxo.  
FONTE: IEEE Std C37.110-2007.

A Figura 2.8 mostra o fluxo resultante e a corrente secundária quando a corrente primária é completamente assimétrica. O aumento do fluxo não é instantâneo, indicando que a saturação não ocorre instantaneamente. Esse intervalo até a saturação é conhecido como “*time-to-saturation*” (tempo até a saturação).

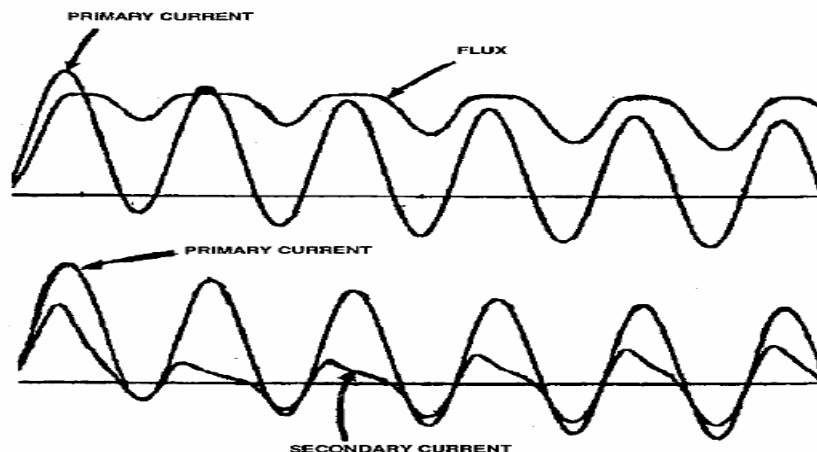


Figura 2.8 – TC saturado: Relação entre corrente primária e fluxo.  
FONTE: IEEE Std C37.110-2007.

#### 2.4.1.2 Tensão de Saturação

A tensão de saturação ( $V_x$ ) é definida como a tensão simétrica, sobre o enrolamento secundário do TC, para a qual o pico de indução excede o valor da densidade de fluxo de saturação do núcleo (IEEE Std C37.110-2007).

### 2.4.1.3 Critérios para Evitar a Saturação

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. 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 saturação pode ser evitada com base nos seguintes critérios:

- 1) Para evitar a saturação causada por correntes simétricas, a tensão de saturação ( $V_x$ ) deve cobrir o valor de tensão secundária de excitação gerada pela máxima corrente primária, conforme (2.14).

$$V_x > I_S \times Z_S \quad (2.14)$$

Em (2.14),  $I_S$  representa a máxima corrente eficaz primária dividida pela relação de transformação e  $Z_S$  é a carga secundária total ( $R_S + X_L + Z_C$ , onde  $R_S$  é a resistência do secundário,  $X_L$  é reatância de dispersão e  $Z_C$  é a impedância da carga).

- 2) Para evitar a saturação na presença de corrente eficaz assimétrica, com carga puramente resistiva, a requerida tensão de saturação é dada conforme (2.15).

$$V_x > I_S \times Z_S \left( 1 + \frac{X}{R} \right) \quad (2.15)$$

Em (2.15),  $X$  e  $R$  representam, respectivamente, a reatância primária do sistema e a resistência até o ponto da falta.

Se a carga do TC tiver uma parcela indutiva, a tensão de saturação, para a corrente assimétrica, é dada conforme (2.16).

$$V_x > I_S \times Z_S \left( 1 + \frac{X}{R} \times \frac{R_S + R_C}{Z_S} \right) \quad (2.16)$$

Considerando também a possível presença de fluxo remanescente, a tensão de saturação é dada por (2.17).

$$V_x > \frac{I_S \times Z_S \left( 1 + \frac{X}{R} \times \frac{R_S + R_C}{Z_S} \right)}{1 - F_R} \quad (2.17)$$

Na Equação (2.17),  $F_R$  representa o fluxo remanescente em p.u.

Esses critérios geralmente resultam em TCs com núcleos muito grandes, podendo inviabilizar o seu uso. Dessa forma, algumas medidas compensadoras devem ser realizadas para minimizar os efeitos da saturação sobre os relés de proteção (IEEE Std C37.110-2007).

#### **2.4.1.4 Causas da Saturação**

O tempo até a saturação é importante para o projeto e aplicação de relés de proteção. Geralmente, um TC é capaz de reproduzir precisamente correntes assimétricas por um ou dois ciclos antes de entrar na região saturada de operação. Segundo o guia da IEEE para aplicação de TCs utilizados para proteção (IEEE Std C37.110-2007), os parâmetros que determinam o tempo até a saturação do TC são:

- 1) Grau de assimetria da corrente de falta: A razão  $X/R$  do sistema e o ângulo de incidência de falta determinam o grau de assimetria da forma de onda da corrente primária. A componente unidirecional contribui com um incremento no fluxo. Quanto maior o grau de assimetria, mais rápido ocorrerá a saturação do TC.
- 2) Magnitude da corrente de falta: A magnitude da corrente assimétrica é proporcional a magnitude da componente senoidal da corrente. Quanto maior a intensidade da corrente, mais rápido o incremento de fluxo até o ponto de saturação.
- 3) Fluxo remanescente no núcleo do TC: O fluxo remanescente (ou residual) no núcleo do TC irá se somar ou subtrair ao fluxo gerado pelas correntes que fluem através do terminal primário do TC, dependendo da polaridade desse fluxo gerado. Quando a presença de fluxo remanescente resulta em um incremento no fluxo total do núcleo, o tempo até a saturação do TC é menor. Em alguns casos em que o fluxo residual é muito alto, o TC pode saturar logo após o início da falta.
- 4) Impedância do circuito secundário: Um TC com elevada carga secundária irá saturar mais rápido do que quando conectado a cargas menores de mesmo fator de potência. Isso ocorre porque cargas elevadas demandam maior tensão para um dado valor de corrente e o fluxo é proporcional a tensão. Para duas impedâncias de mesma magnitude, a que tiver maior parcela indutiva (fator de potência menor) fará com que o TC sature de forma mais lenta, ou seja, o tempo até a saturação é maior do que para cargas puramente resistivas ou com menores parcelas indutivas. Isso ocorre porque a indutância representa baixa impedância para componentes contínuas das correntes assimétricas, reduzindo a tensão na carga e o fluxo associado.

- 5) Tensão de saturação: A impedância secundária de excitação de um TC depende da quantidade de ferro no núcleo. Quanto maior a área da seção transversal do núcleo, maior o fluxo requerido para a saturação do mesmo. Isso aumenta o valor da tensão de saturação e, conseqüentemente, aumenta o tempo até a saturação.
- 6) Razão de espiras: Para uma dada área de núcleo e valor de corrente primária, aumentando a razão de espiras do TC o fluxo diminui e, por isso, a densidade de fluxo é reduzida (IEEE C37.110-2007).

#### **2.4.2 Os Efeitos do Fluxo Remanescente**

O fluxo remanescente no núcleo do TC depende do valor de fluxo imediatamente antes da interrupção da corrente primária. O valor de fluxo é determinado pelo valor da corrente primária simétrica, da componente unidirecional e da impedância do circuito secundário. O máximo fluxo remanescente ocorre quando a corrente primária é interrompida enquanto o transformador encontra-se saturado (IEEE Std C37.110-2007).

Devido a sua polaridade, o fluxo remanescente pode levar o TC à saturação mais rapidamente durante eventos como curtos-circuitos, conforme abordado na seção anterior.

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.

O fluxo remanescente pode ser controlado de diversas formas, incluindo o uso de:

- Diferentes quantias de aço no núcleo: Núcleos laminados a frio, grãos-orientados e aço silício são os materiais usados na maioria dos TCs de proteção. Esses materiais podem ter fluxo remanescente de até 80% do valor de saturação. Núcleos laminados a quente não tem a mesma permeabilidade magnética nem as baixas perdas dos núcleos laminados a frio, porém o fluxo remanescente máximo é equivalente a, aproximadamente, metade do valor para os núcleos laminados a frio.
- Núcleos com entreferro: Causam dois efeitos no desempenho do TC – elevam a corrente de magnetização e reduzem a possibilidade de remanescência. A presença de entreferros no núcleo não afeta o desempenho do TC, mas reduz o fluxo remanescente a valores muito pequenos. TCs com entreferros grandes em seus núcleos, às vezes referidos como núcleos linearizados, têm baixa ou nenhuma remanescência.

- Núcleo com duas magnetizações: Consiste de um núcleo feito de duas seções iguais. Devido a um arranjo apropriado de enrolamentos e a presença de uma fonte CC, uma seção do núcleo é magnetizada com até 75% da máxima densidade de fluxo com polaridade positiva, enquanto a outra seção do núcleo é magnetizada com polaridade negativa. O transformador opera normalmente exceto pela ação de anulação do fluxo. Essa ação protege contra a existência de qualquer remanescência no núcleo do TC. Caso a fonte CC falhe, não ocorrerá a anulação do fluxo e a operação será equivalente a de um TC convencional.

### **2.4.3 Efeitos da Saturação Sobre os Principais Tipos de Proteção**

#### *2.4.3.1 Efeitos da Saturação em Relés de Sobrecorrente*

EL-AMIN & AL-ABBAS (2006) afirmam que TCs saturados podem prover corrente suficiente para a operação de relés de sobrecorrente instantâneos, não afetando o desempenho dos mesmos. Entretanto, 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.

Além disso, KOJOVIC (2002) afirma que, se os relés de sobrecorrente forem ajustados adequadamente, os atrasos na operação desses equipamentos não causarão problemas de descoordenação com outros dispositivos de proteção.

#### *2.4.3.2 Efeitos da Saturação em Relés de Distância*

MOONEY (2008) verificou que a saturação do TC resulta em uma redução da magnitude de corrente e defasagem da mesma, causando um aumento significativo na impedância vista por relés de distância. Isto resulta em problemas de subalcance e atrasos na operação desses relés.

#### *2.4.3.3 Efeitos da Saturação em Relés Diferenciais*

Embora relés diferenciais sejam considerados confiáveis e robustos, existem situações em que esses dispositivos serão induzidos a operar indevidamente. Critérios de alta sensibilidade e seletividade podem não considerar a possibilidade da saturação do TC para faltas externas, podendo levar o relé a operar de forma incorreta (REBIZANT *et al.*, 2004).



A saturação do TC, durante faltas externas, gera correntes diferenciais fictícias que podem ser maiores do que os valores de ajuste para operação do relé diferencial. Sendo assim, o relé irá considerar a falta externa como interna e irá operar indevidamente (DASHTI *et al.*, 2007).

## **2.5 Considerações Finais**

Neste Capítulo, introduziram-se os fundamentos dos transformadores de corrente e o fenômeno da saturação dos TCs. Tal abordagem teórica foi realizada com objetivo de fornecer conhecimentos básicos sobre este fenômeno. Noções básicas relacionadas à especificação e fabricação dos TCs foram abordadas. Também foram discutidos conceitos básicos para o melhor entendimento do fenômeno da saturação.

A saturação dos TCs pode implicar na operação indevida dos relés de proteção conectados e, até mesmo, na não operação ou no atraso da operação dos mesmos.

Os efeitos da saturação dos TCs sobre os principais tipos de relés de proteção também foram apresentados.

No Capítulo seguinte, são apresentadas algumas metodologias para detecção e compensação dos intervalos em que a forma de onda da corrente secundária encontra-se distorcida.

## *Capítulo 3*

# **TÉCNICAS PARA DETECÇÃO E CORREÇÃO DOS INTERVALOS DISTORCIDOS PELA SATURAÇÃO**

### **3.1 Considerações Gerais**

A saturação de TCs pode implicar na operação indevida ou até na não operação dos relés de proteção, uma vez que os sinais distorcidos em virtude desse fenômeno podem ser mal processados pelos respectivos dispositivos de proteção.

Além das soluções convencionais estipuladas em normas técnicas, metodologias utilizando ferramentas matemáticas e computacionais, ou inteligência artificial, têm sido aplicadas para garantir a atuação adequada dos sistemas de proteção, durante os intervalos em que o TC se encontra saturado.

Graças aos avanços da tecnologia no que diz respeito aos relés numéricos, diversas técnicas para detecção e correção dos intervalos de saturação têm sido estudadas e implementadas, tornando os esquemas de proteção mais confiáveis e seguros.

O presente Capítulo descreve algumas dessas metodologias e apresenta novas propostas para detecção das distorções na forma de onda da corrente secundária, que ocorrem em virtude da saturação dos TCs.

### **3.2 Técnicas de Detecção**

Para uma compensação adequada dos efeitos da saturação, uma detecção precisa dos intervalos distorcidos em virtude desse fenômeno é essencial para o funcionamento adequado das metodologias de correção. Tais metodologias são extremamente dependentes da detecção dos intervalos de saturação, uma vez que podem atuar indevidamente, adicionando erros desnecessários ao sinal de corrente para intervalos detectados erroneamente.

Vários métodos para detecção já foram propostos e todos utilizam diversos tipos de ferramentas matemáticas e computacionais. Algumas dessas técnicas serão descritas ao longo deste capítulo. Os métodos foram implementados e os resultados são apresentados no

Capítulo seguinte, todos combinados com as técnicas de correção correspondentes às propostas originais.

### 3.2.1 Detecção Utilizando Transformada Wavelet Discreta

Por sua facilidade de implementação e capacidade de detecção de descontinuidades nos sinais analisados, a Transformada Wavelet Discreta (TWD) é uma ferramenta matemática amplamente utilizada na análise de sinais. Em 2002, LI *et al.* propuseram a utilização dessa técnica para a detecção dos intervalos distorcidos da corrente secundária, causados pela saturação dos TCs.

A partir da TWD, um sinal pode ser representado como uma soma de funções wavelet e funções escala com coeficientes para diferentes instantes e escalas (frequências). De acordo com a TWD (BURRUS *et al.*, 1998), um sinal  $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$  pode ser expresso em termos de  $\phi(t)$  e  $\varphi(t)$  conforme (3.1).

$$f(t) = \sum_k c_{j_0}(k) 2^{-\frac{j_0}{2}} \phi(2^{-j_0}t - k) + \sum_k \sum_{j=j_0}^{\infty} d_j(k) 2^{-\frac{j}{2}} \varphi(2^{-j}t - k) \quad (3.1)$$

Em (3.1),  $\phi(t)$ ,  $\varphi(t)$ ,  $c_{j_0}$  e  $d_j$  representam, respectivamente, a função escala, a função wavelet, os coeficientes de escala no nível mais grosseiro  $j_0$  e os coeficientes *wavelet* (detalhe do sinal) para a escala  $j$ . A metodologia proposta pelos referidos autores utiliza a *wavelet* Daubechies 4 (DB4), considerando apenas o primeiro nível de detalhe do sinal (coeficiente  $d_1$ ) para a detecção dos intervalos distorcidos por saturação.

Para um sinal distorcido por saturação, o primeiro nível de detalhe do sinal será descontínuo, conforme mostra a Figura 3.1(b). Durante os intervalos sem saturação, os valores de detalhe são próximos a zero devido à propriedade dos momentos nulos da função *wavelet*. Entretanto, quando o sinal é descontínuo, os coeficientes de detalhe sofrem variações, caracterizadas por picos de curta duração no sinal de detalhe. Esses picos contêm coeficientes elevados que, claramente, marcam o início e fim dos trechos distorcidos na forma de onda do sinal analisado, distinguindo assim os intervalos em que o TC encontra-se saturado.

Essa metodologia foi implementada em Matlab<sup>®</sup>, sendo utilizada a função *dwt* que desempenha a transformada wavelet discreta. A janela de dados foi fixada em oito amostras

para uma amostragem de 96 amostras por ciclo. A condição que caracteriza a detecção dos intervalos de saturação é descrita pela expressão (3.2).

$$|d_{Th}| > 0,03 \quad (3.2)$$

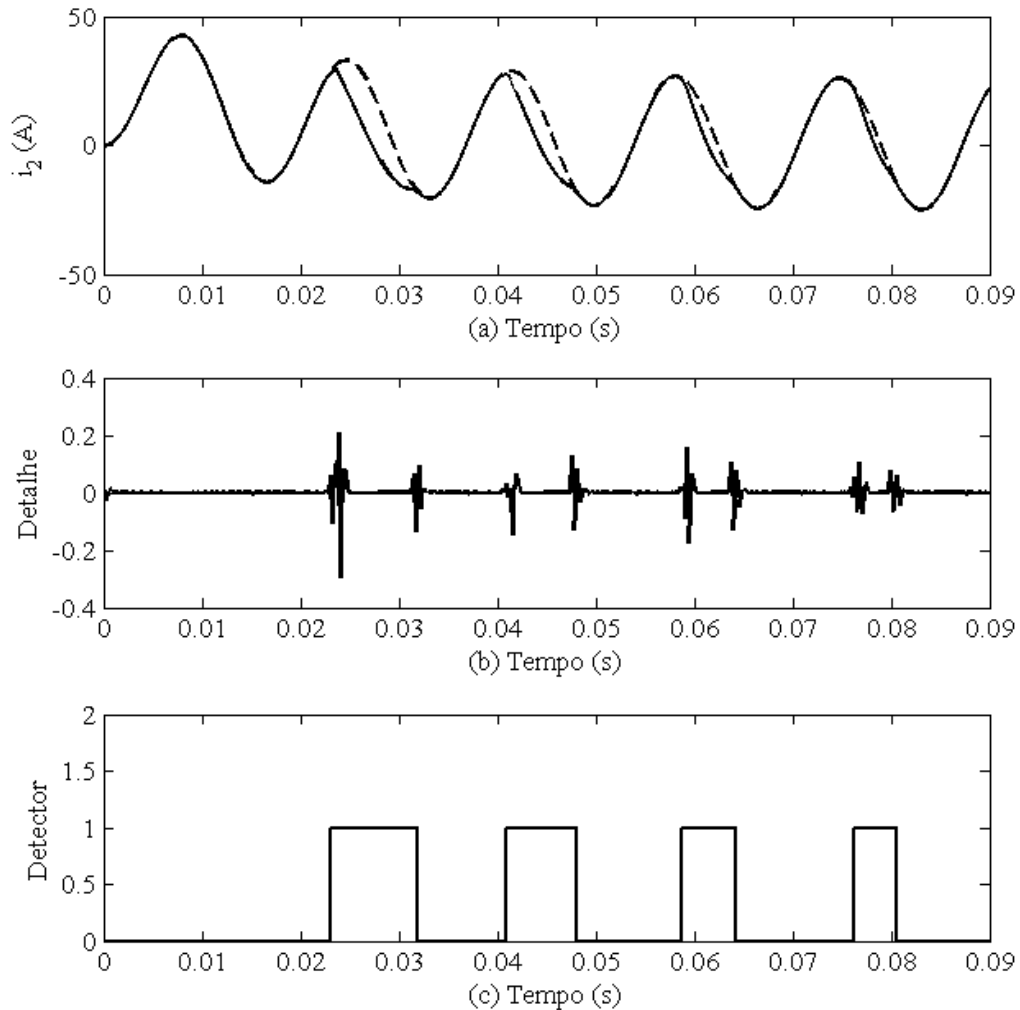


Figura 3.1 – Transformada Wavelet Discreta aplicada a um sinal de corrente distorcido por saturação. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e distorcida. (b) Detalhe do sinal no primeiro nível de transformada. (c) Detector de saturação.

Como os autores da proposta não descrevem como determinar um ajuste para a detecção, esse valor foi escolhido empiricamente e fixado em 0,03.

A proposta de LI *et al.* (2002) ainda descreve uma metodologia para correção dos sinais distorcidos que foi associada a esta técnica de detecção. Tal metodologia é descrita na Seção 3.4.2.

### 3.2.2 Detecção da Saturação a Partir das Funções-Diferença do Sinal Analisado

KANG *et al.* (2004a) propuseram uma metodologia para detecção dos intervalos de saturação que é fundamentada nas funções-diferença do sinal amostrado. Os valores das funções-diferença apresentam incrementos significativos em seus valores nos pontos equivalentes ao início e fim de um intervalo de saturação.

A primeira, a segunda e a terceira função-diferença de um sinal são dadas conforme as equações (3.3), (3.4) e (3.5), respectivamente.

$$\text{del1}(n) = i_2(n) - i_2(n - 1) \quad (3.3)$$

$$\text{del2}(n) = \text{del1}(n) - \text{del1}(n - 1) \quad (3.4)$$

$$\text{del3}(n) = \text{del2}(n) - \text{del2}(n - 1) \quad (3.5)$$

Nas equações (3.3), (3.4) e (3.5),  $n$  representa a amostra atual a qual as funções-diferença devem ser associadas.

Os autores afirmam que  $\text{del1}$  sofre incremento significativo nos pontos imediatamente após os valores que indicam o início e o fim dos intervalos distorcidos, o que representaria uma detecção atrasada da saturação. Porém, afirmam que tanto  $\text{del2}$  quanto  $\text{del3}$  podem ser utilizadas na detecção dos intervalos de saturação.

A condição para detecção da saturação, definida pelos autores da proposta, é dada em (3.6).

$$|\text{del3}(n)| > Th \quad (3.6)$$

Onde  $Th$  é o valor de ajuste que representa o maior valor de  $\text{del3}$  para o qual o TC é considerado livre de saturação. Esse valor pode ser determinado usando a Equação (3.7).

$$Th = k\sqrt{2}I_{f \max} \left[ 2\text{sen} \left( \frac{\pi}{N} \right) \right]^3 \quad (3.7)$$

Em (3.7),  $I_{f \max}$  é máxima corrente de falta,  $k$  é um fator de margem que considera a possibilidade da presença de um filtro passa-baixa e sensibilidade do algoritmo,  $N$  é a taxa de amostragem por ciclo.

A Figura 3.2 ilustra o funcionamento da metodologia, onde é possível notar os incrementos nos valores das funções-diferença para os instantes que caracterizam início e fim dos intervalos de saturação.

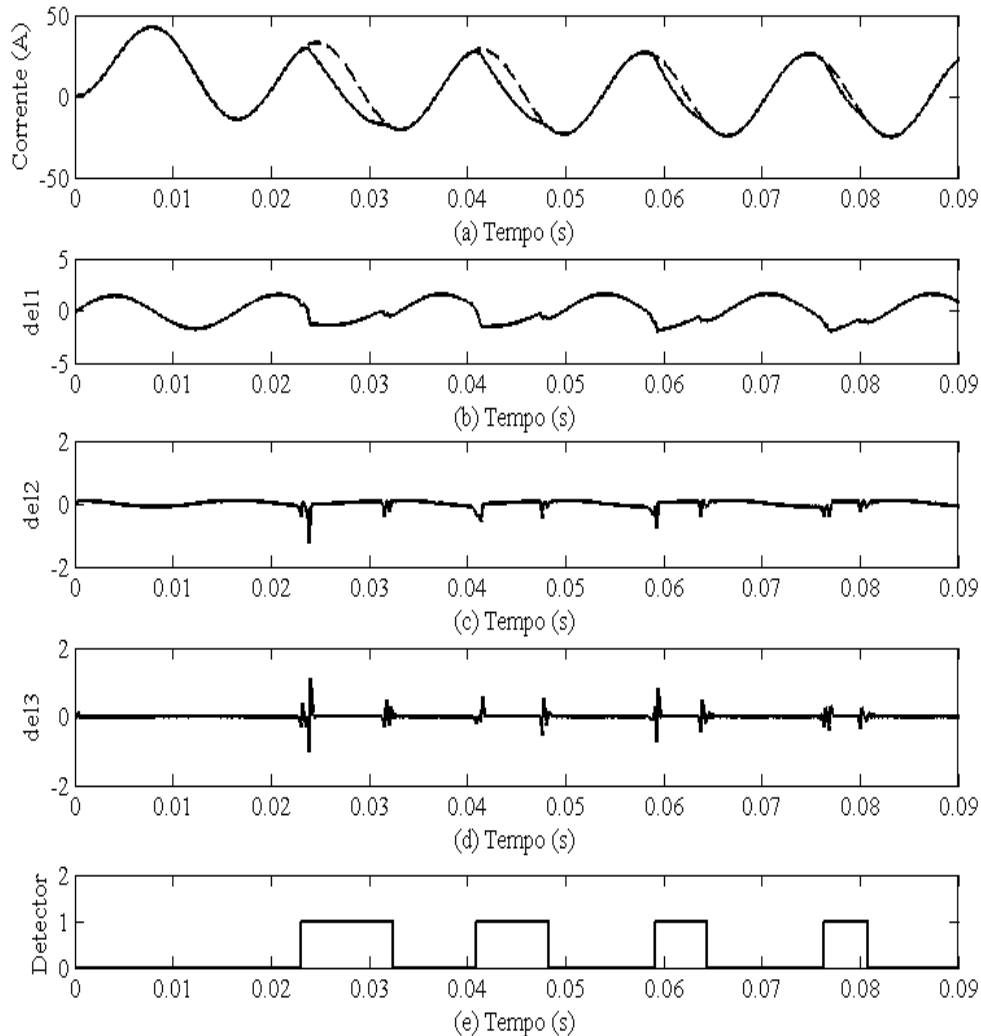


Figura 3.2 – Detecção dos intervalos de saturação através das funções-diferença do sinal analisado. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e distorcida. (b) Valores para a primeira-função diferença del1. (c) Valores para a segunda função-diferença del2. (d) Valores para a terceira função-diferença del3. (e) Detector de saturação.

### 3.2.3 Detecção por Meio de Morfologia Matemática

Proposta por LU *et al.* (2008), essa metodologia utiliza operações da Morfologia Matemática (WU *et al.*, 2009) para detecção das distorções presentes na forma de onda da corrente secundária, causadas em virtude da saturação dos TCs.

Uma janela móvel de dados, com um número ímpar de amostras, é analisada em função de seu termo central. As amostras devem ser separadas em dois conjuntos de dados: amostras pares ( $x_e[n]$ ) e ímpares ( $x_o[n]$ ). Por exemplo, para uma janela de dados com sete

amostras  $x[n] = [x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]$ , os valores de  $x$  com índice zero ou valor par são associados à  $x_e[n]$  ( $x_e[n] = [x_0, x_2, x_4, x_6]$ ). Os valores de  $x$  com índices ímpares são associados à  $x_o[n]$  ( $x_o[n] = [x_1, x_3, x_5]$ ). Ainda referente à janela de dados, pode-se afirmar que o termo central é representado por  $x_3$  e o termo  $x_6$  indica a posição da última amostra recebida (valor atual do sinal) na janela de dados.

Desde que os sinais básicos em um sistema de potência são compostos por senóides, um Elemento Estruturante (*Structuring Element* ou *SE*) pode representar as características senoidais dos sinais de corrente secundária. Considerando que as senóides e as co-senóides são simétricas, o SE deve ser simétrico, conforme mostrado em (3.8).

$$k_m = [\cos(2m - 1) \varphi, \dots, \cos\varphi, \cos\varphi, \dots, \cos(2m - 1) \varphi] \quad (3.8)$$

Em (3.8),  $\varphi = 2\pi ft$ , onde  $f$  é a frequência do sistema de potência e  $t$  é o intervalo entre duas amostras consecutivas. O comprimento total de  $k_m$  é igual a  $2m$ , onde  $m$  é um inteiro positivo e tem valores diferentes para diferentes SEs. Como o SE é espelhado, a posição dos valores no conjunto é  $v = 1, \dots, m$ , tanto para a direita quanto para a esquerda, contados a partir do eixo de simetria do conjunto.

De acordo com as características do SE, os operadores Dilatação e Erosão são dados conforme (3.9) e (3.10), respectivamente.

$$(x \oplus k_m) = \max_{n-v \in \mathcal{D}_x, v \in \mathcal{D}_{k_m}} \left\{ \frac{x(n-v)}{k_m(v)} \right\} \quad (3.9)$$

$$(x \ominus k_m) = \min_{n+v \in \mathcal{D}_x, v \in \mathcal{D}_{k_m}} \left\{ \frac{x(n+v)}{k_m(v)} \right\} \quad (3.10)$$

Em (3.9) e (3.10),  $n$  representa a posição do termo central da janela de dados,  $n-v$  representa a posição dos termos à esquerda do termo central e  $n+v$ , a posição dos termos à direita do termo central. No cálculo da dilatação são utilizados os termos da esquerda da SE. Analogamente, no cálculo da erosão são utilizados os termos da direita da SE.

O detalhe do sinal é obtido a partir da diferença entre o valor central da janela de dados e um valor estimado, conforme (3.11).

$$d[n] = x_o[n] - P(x_e[n]) \quad (3.11)$$

Em (3.11),  $x_o[n]$  representa o valor central da janela de dados e  $P$ , o operador morfológico para estimação. Tal operador é uma média dos valores de dilatação e erosão resultantes do uso de SEs com comprimentos diferentes. O operador morfológico para estimação, utilizado na detecção da saturação, pode ser calculado por (3.12).

$$P(x_e) = \frac{1}{2D} \sum_{i=1}^D (x_e \oplus k_i + x_e \ominus k_i) \quad (3.12)$$

Onde  $k_i$  representa um SE com comprimento  $2i$  ( $i = 1, \dots, D$ ) conforme definido em (3.8). Quando  $i = D$ , o número de amostras pares usadas na estimação é equivalente a  $2D$ , sendo  $D$  elementos na vizinhança esquerda e  $D$  na vizinhança direita do termo central da janela de dados.

Durante os intervalos não distorcidos pela saturação do TC, os valores do detalhe do sinal são próximos a zero. Entretanto, nos pontos que caracterizam início e fim de saturação, o sinal do detalhe apresenta incrementos significativos, diferenciando os trechos distorcidos dos intervalos sem saturação. A Figura 3.3 ilustra o funcionamento da metodologia, mostrando o detalhe do sinal de corrente secundária.

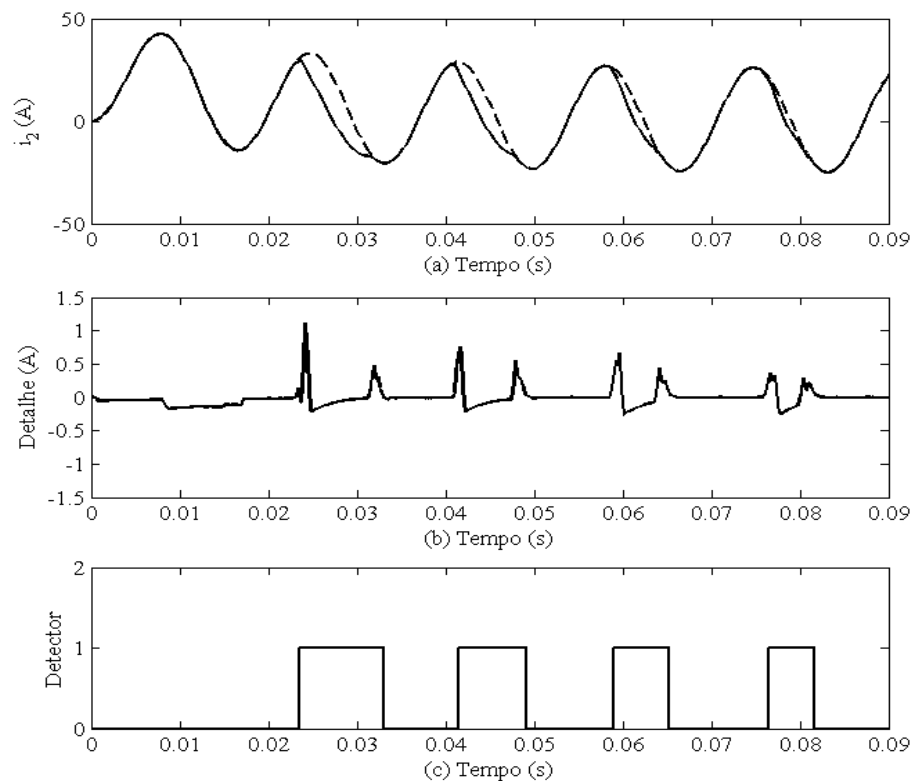


Figura 3.3 – Detecção dos intervalos de saturação por Morfologia Matemática. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e distorcida. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação.



Essa metodologia foi implementada no Matlab<sup>®</sup>, sendo a janela de dados ajustada em sete amostras (quatro amostras pares) para uma amostragem de 96 amostras/ciclo. Duas SEs,  $k_1$  e  $k_2$ , foram utilizadas no processo de estimação.

Os autores da proposta não definem um valor de ajuste para detecção. Entretanto, esse valor foi obtido empiricamente. A condição para detecção do início e fim de um intervalo de saturação é descrita pela expressão (3.13).

$$|d(n)| > 0,08 \quad (3.13)$$

### 3.3 Técnicas de Detecção Propostas na Dissertação

#### 3.3.1 Detecção da Saturação Através do Ângulo Formado Entre as Diferenças do Sinal de Corrente

A Figura 3.4 mostra uma forma de onda medida no terminal secundário de um TC não saturado. Durante um evento transitório, a forma senoidal da corrente é mantida sem qualquer distorção.

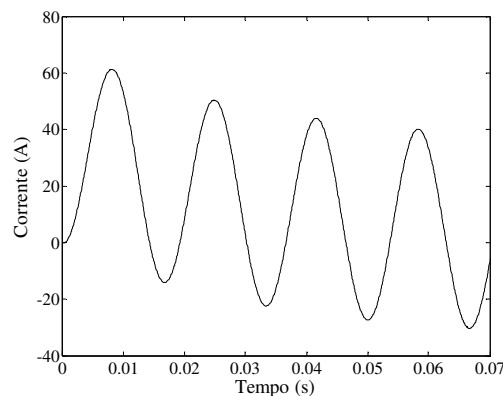


Figura 3.4 – Forma de onda da corrente no terminal secundário de um TC não saturado.

Calculando o valor absoluto das diferenças entre dois pontos consecutivos da curva da Figura 3.4, de acordo com (3.14), obtém-se a curva mostrada na Figura 3.5. Em (3.14),  $n$  representa a amostra atual a qual deve ser associada  $\Delta i_2$ .

$$\Delta i_2(n) = |i_2(n) - i_2(n - 1)| \quad (3.14)$$

De acordo com a Figura 3.5, o valor absoluto das diferenças de  $i_2$  apresenta um comportamento característico, que se repete após certo intervalo de tempo.

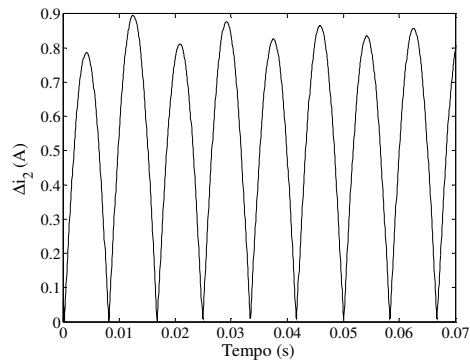


Figura 3.5 – Valor absoluto da diferença entre pontos da corrente do terminal secundário do TC.

Quando o TC satura, a forma de onda do terminal secundário é distorcida, conforme mostra a Figura 3.6. Devido à grande variação de corrente entre o primeiro ponto da região saturada e o último ponto da região não saturada, os inícios dos intervalos de saturação encontram-se dentro dos picos maiores presentes na curva das diferenças de  $i_2$ .

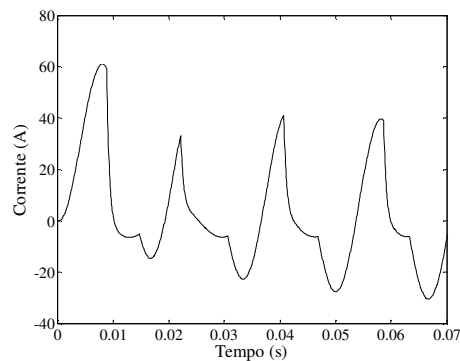


Figura 3.6 – Sinal distorcido pela saturação.

Da mesma forma, os fins de saturação são caracterizados por valores dentro dos picos de menor intensidade. Esses picos aparecem destacados na Figura 3.7.

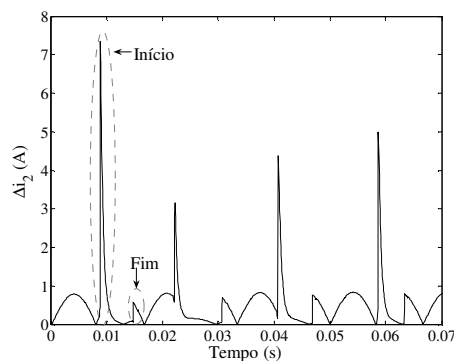


Figura 3.7 – Valor absoluto das diferenças (sinal distorcido).

Como a variação entre as diferenças é grande dentro dos picos, o ângulo  $\alpha$  formado entre estas tem valor elevado, diferentemente do que ocorre nas demais regiões, em que as variações são suaves e, conseqüentemente, os ângulos entre as diferenças são pequenos.

Estes ângulos podem ser calculados pela relação do arco tangente para o triângulo retângulo (3.15), normalizando a distância horizontal entre as diferenças como igual a um, conforme mostra a Figura 3.8.

$$\alpha(n)^\circ = \tan^{-1} \left( \frac{\Delta i_2(n) - \Delta i_2(n-1)}{1} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (3.15)$$

O critério utilizado para a detecção dos pontos correspondentes ao início e fim da saturação é descrito na expressão (3.16). Quando essa condição é satisfeita, o valor do detector é um, caso contrário é zero.

$$|\alpha(n)| > 10^\circ \quad (3.16)$$

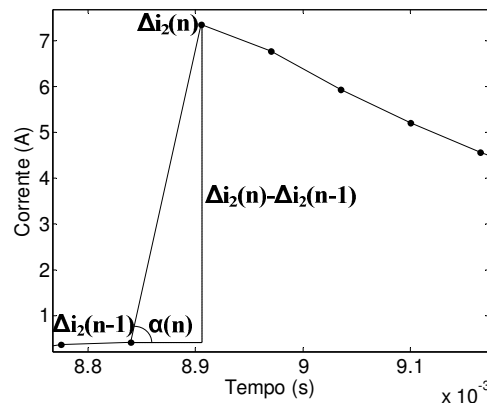


Figura 3.8 – Detalhe do pico indicativo de saturação no sinal das diferenças entre pontos da corrente secundária.

O valor de ajuste  $10^\circ$  foi obtido empiricamente a partir da análise de vários sinais, obtidos por meio de simulação, e foi escolhido por apresentar maior capacidade de detecção dos inícios e fins dos intervalos de saturação presentes nesses sinais. Esse ajuste foi eficaz para amostragens de 64, 96 e 256 amostras por ciclo. Para amostragens maiores a mesma eficácia não foi verificada, pois o valor das diferenças entre amostras consecutivas de  $i_2$  torna-se menor quanto maior o número amostras, o que provoca redução no valor dos ângulos

Além disso, o critério garante que somente pontos dentro dos picos sejam detectados, uma vez que estes representam as variações bruscas do sinal de corrente, permitindo assim a identificação dos intervalos distorcidos por saturação. Mais detalhes sobre esta metodologia

podem ser encontrados em SANTOS *et al.* (2010a). A Figura 3.9 exemplifica o funcionamento da metodologia.

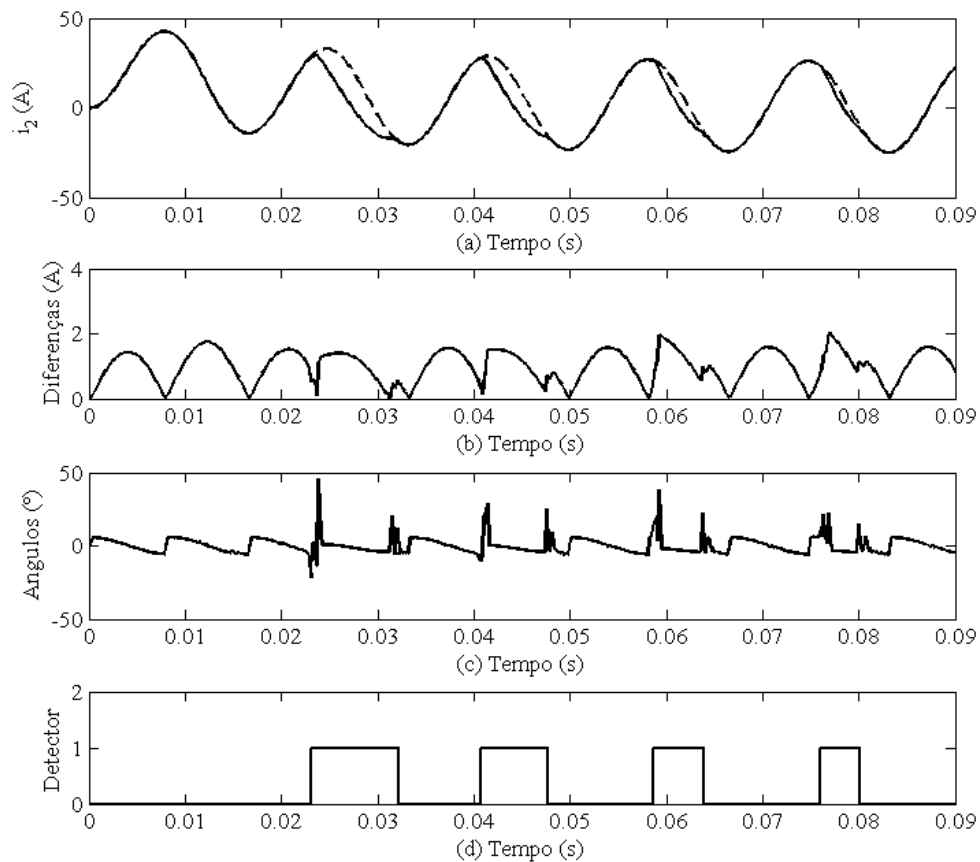


Figura 3.9 – Detecção dos intervalos de saturação pelos ângulos formados entre diferenças consecutivas do sinal de corrente. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e distorcida. (b) Módulo das diferenças. (c) Valor dos ângulos. (d) Detector de saturação.

### 3.3.2 Detecção da Saturação Através da Terceira Derivada

A detecção do início e fim dos intervalos de saturação ocorre quando o valor da diferença, entre a amostra atual e um valor previamente calculado, excede o valor limítrofe de erro para essa estimativa. A estimativa é feita a partir da terceira derivada do sinal amostrado (WISZNIEWSKI *et al.*, 2008), conforme (3.17), onde  $n$  representa a amostra a ser estimada.

$$i_{2e}(n) = 4 \cdot i_2(n - 1) - 6 \cdot i_2(n - 2) + 4 \cdot i_2(n - 3) - i_2(n - 4) \quad (3.17)$$

A condição que determina a identificação dos intervalos distorcidos é dada em (3.18). Uma vez que esta seja verdadeira, fica caracterizado o início ou o fim da saturação.

$$|i_{2e}(n) - i_2(n)| > \varepsilon_{Th} \quad (3.18)$$

Em (3.18),  $\varepsilon_{Th}$  representa o valor limite para o erro da estimativa. As Figuras 3.10(a) e 3.10(b) exemplificam, respectivamente, os processos de detecção do início e do fim de um intervalo de saturação.

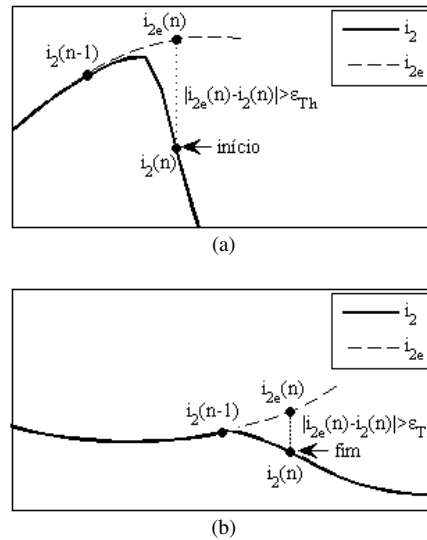


Figura 3.10 – Detecção dos intervalos de saturação. (a) Detecção do início. (b) Detecção do fim.

Quando um início fica caracterizado, o valor do detector muda de zero para um e permanece com esse valor até que o final do intervalo de saturação seja detectado. O valor de  $\varepsilon_{Th}$  deve ser escolhido de forma a prover maior precisão ao processo de detecção e pode variar conforme a amostragem do sistema. Nos casos estudados  $\varepsilon_{Th}$  foi fixado em 0,15 para uma amostragem de 96 amostras/ciclo. Outras amostragens foram testadas (32, 64 e 256 amostras/ciclo), porém diferentes valores de ajuste tiveram de ser fixados. A Figura 3.11 ilustra o funcionamento da metodologia. Mais detalhes sobre a metodologia podem ser vistos em SANTOS *et al.* (2010b).

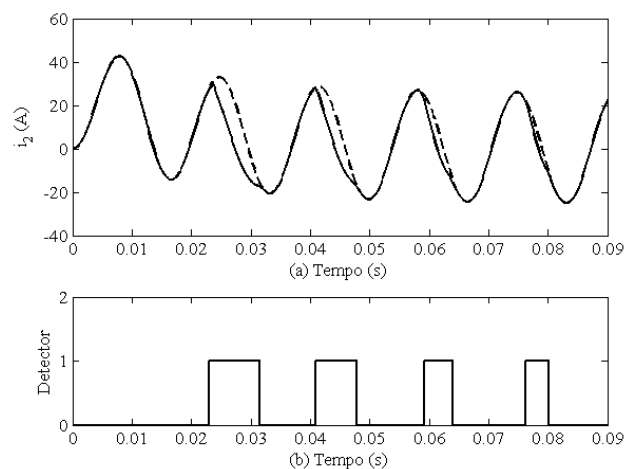


Figura 3.11 – Detecção dos intervalos de saturação pela terceira derivada do sinal de corrente. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e distorcida. (b) Detector de saturação.

### 3.3.3 Detecção da Saturação Através da Distância Entre Pontos Consecutivos nos Planos Formados por Amostras de Corrente Secundária e suas Funções-Diferença

A primeira, a segunda e a terceira função-diferença de um sinal amostrado são dadas, respectivamente, pelas equações descritas em (3.19), (3.20) e (3.21) (KANG *et. al*, 2004a).

$$\text{del1}(n) = i_2(n) - i_2(n - 1) \quad (3.19)$$

$$\text{del2}(n) = \text{del1}(n) - \text{del1}(n - 1) \quad (3.20)$$

$$\text{del3}(n) = \text{del2}(n) - \text{del2}(n - 1) \quad (3.21)$$

Em (3.19), (3.20) e (3.21),  $n$  representa a amostra atual a qual devem ser associados os valores de  $\text{del1}$ ,  $\text{del2}$  e  $\text{del3}$ .

Os valores das funções-diferença para a corrente secundária de um TC não saturado apresentam pouca variação entre pontos consecutivos. Conseqüentemente, representando esses valores como pares ordenados em planos formados por  $\text{del1} \times i_2$ ,  $\text{del2} \times \text{del1}$  e  $\text{del3} \times \text{del2}$ , os pontos estarão distribuídos em uma trajetória razoavelmente definida em torno do ponto (0,0) de cada plano, conforme mostra a Figura 3.12.

Na Figura 3.12(a) e 3.12(b), pode-se notar o efeito da componente exponencial decrescente da corrente de curto-circuito, que desloca a trajetória dos pontos em relação ao eixo  $i_2$ , tornando a análise nesse plano um desafio maior. Por esse motivo, a detecção dos intervalos de saturação do TC é realizada nos planos  $\text{del2} \times \text{del1}$  e  $\text{del3} \times \text{del2}$  (Figuras 3.12(c) e 3.12(d), respectivamente), embora os conceitos aplicados a estes planos sejam válidos para o plano  $\text{del1} \times i_2$ .

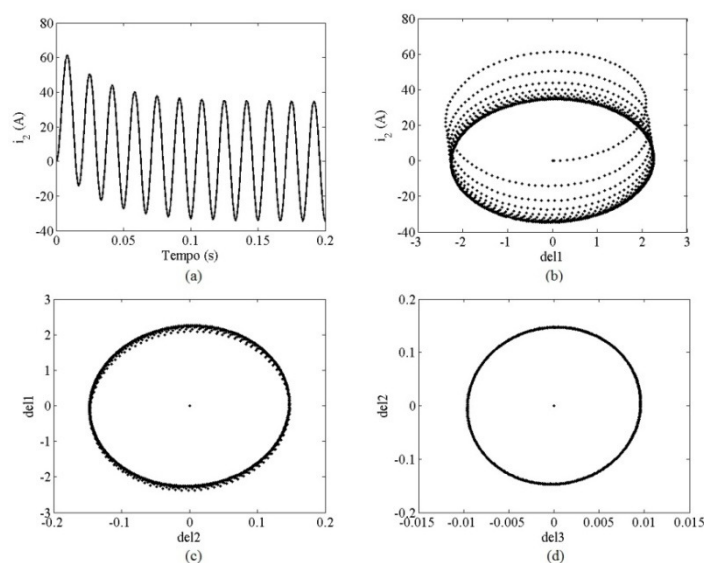


Figura 3.12 – Sinal de corrente e os planos gerados. (a) Sinal de corrente sem saturação. (b) Plano formado por  $\text{del1} \times i_2$ . (c) Plano formado por  $\text{del2} \times \text{del1}$ . (d) Plano formado por  $\text{del3} \times \text{del2}$ .

No instante em que a saturação ocorre, o respectivo ponto é deslocado subitamente em relação aos pontos anteriores e os pontos seguintes passam a descrever trajetórias bastante diferentes daquelas mostradas na Fig. 3.12. Isso ocorre até o instante em que o efeito da saturação cessa. As Figuras. 3.13 e 3.14 mostram a decomposição de um sinal de corrente distorcido em virtude da saturação do TC de acordo com cada plano.

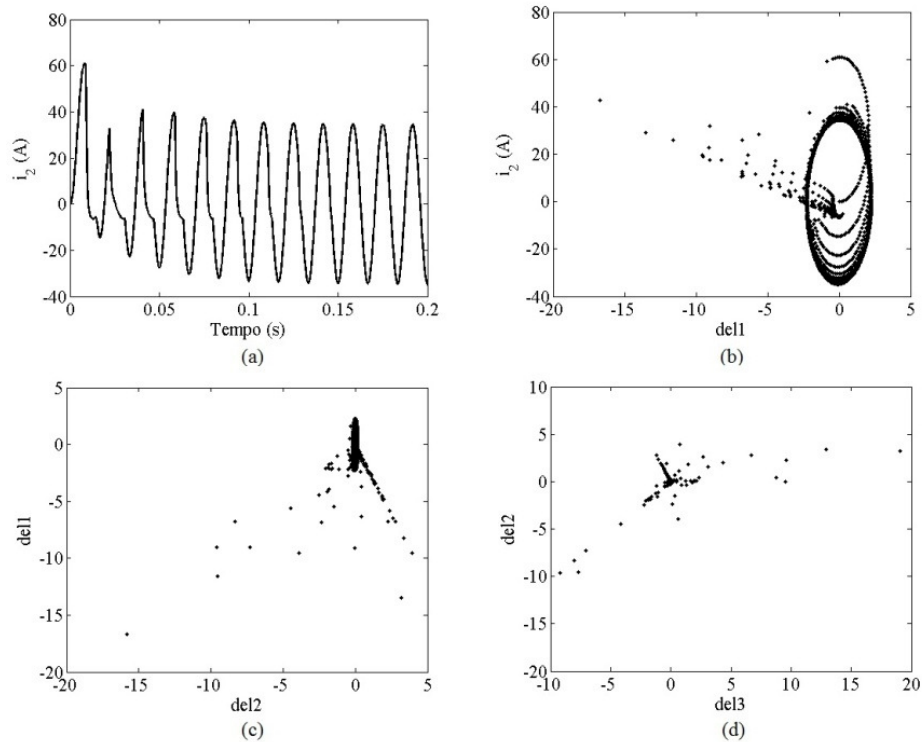


Figura 3.13 – Sinal de corrente e os planos gerados. (a) Sinal de corrente com saturação. (b) Plano formado por  $del1 \times i_2$ . (c) Plano formado por  $del2 \times del1$ . (d) Plano formado por  $del3 \times del2$ .

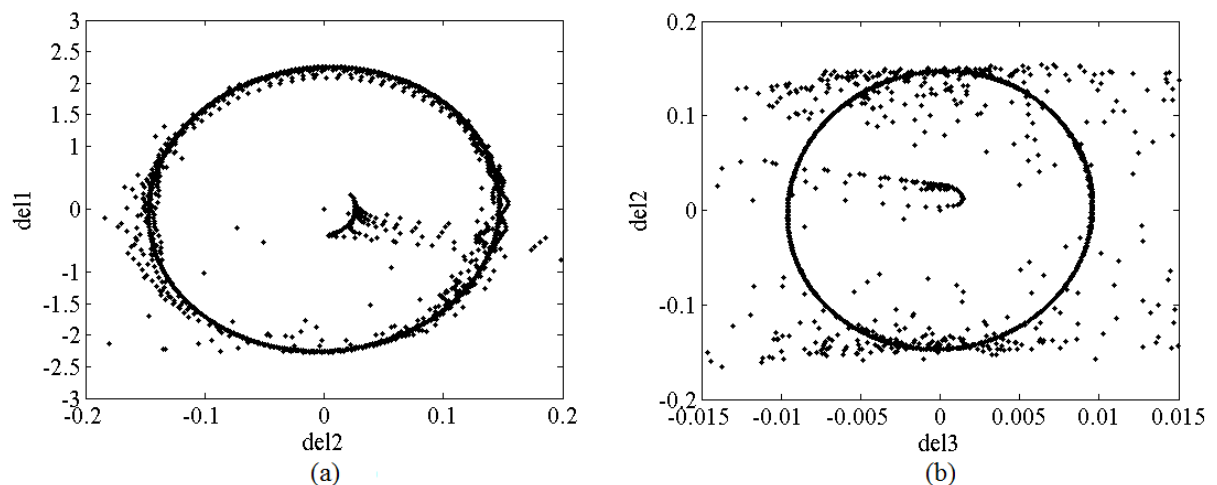


Figura 3.14 – Detalhe dos planos  $del2 \times del1$  e  $del3 \times del2$  para o sinal distorcido por saturação. (a) Plano  $del2 \times del1$ . (b) Plano  $del3 \times del2$ .

A Figura 3.15 mostra a decomposição nos planos  $del2 \times del1$  e  $del3 \times del2$  do sinal de corrente da Figura 3.13(a) até o instante em que o sinal começa a ser distorcido pela saturação. Nessas figuras,  $n$  representa o primeiro ponto do intervalo distorcido e  $n-1$ , o último valor de  $i_2$  não afetado pela saturação. A distância entre os pontos  $n$  e  $n-1$  é maior do que a distância entre cada ponto anterior.

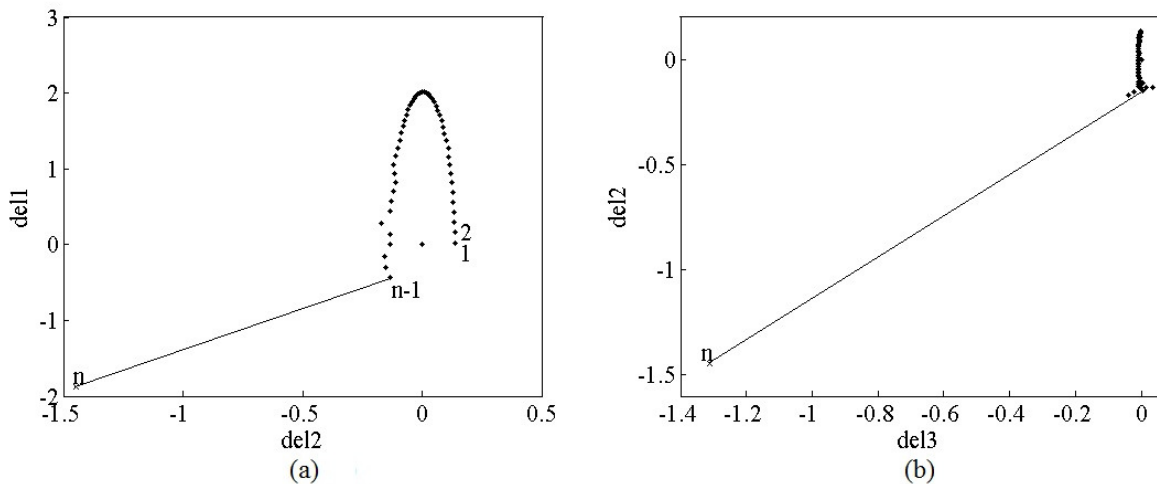


Figura 3.15 – Planos  $del2 \times del1$  e  $del3 \times del2$  até o instante em que inicia a distorção do sinal de corrente por efeito da saturação do TC. (a) Plano  $del2 \times del1$ . (b) Plano  $del3 \times del2$ .

Dessa forma, pode-se afirmar que o início de um intervalo de saturação ocorre quando o valor da distância entre pontos consecutivos aumenta repentinamente nos planos  $del2 \times del1$  e  $del3 \times del2$ .

Durante o período em que o TC encontra-se saturado, os pontos aparecem distribuídos aleatoriamente em torno do centro  $(0,0)$  de ambos os planos, aproximando-se deste quando os valores das funções-diferença tendem para zero. Quando o efeito da saturação se aproxima do fim, os valores das funções-diferença sofrem variações, deslocando os pontos em seus respectivos planos e, conseqüentemente, causando incrementos no valor das distâncias entre pontos consecutivos. A partir do instante em que ocorre uma variação desse tipo, a posição dos pontos oscila em torno da trajetória descrita antes do início da saturação. Logo, pode-se concluir que o fim do intervalo de saturação é encontrado quando os pontos, em seus respectivos planos, retomam um caminho semelhante àquele anterior ao início da saturação.

A Figura 3.16 mostra os planos  $del2 \times del1$  e  $del3 \times del2$  para alguns valores de  $i_2$  após o intervalo de saturação, onde  $m$  representa o primeiro ponto do novo intervalo sem saturação e  $m-1$ , o último ponto da região distorcida.



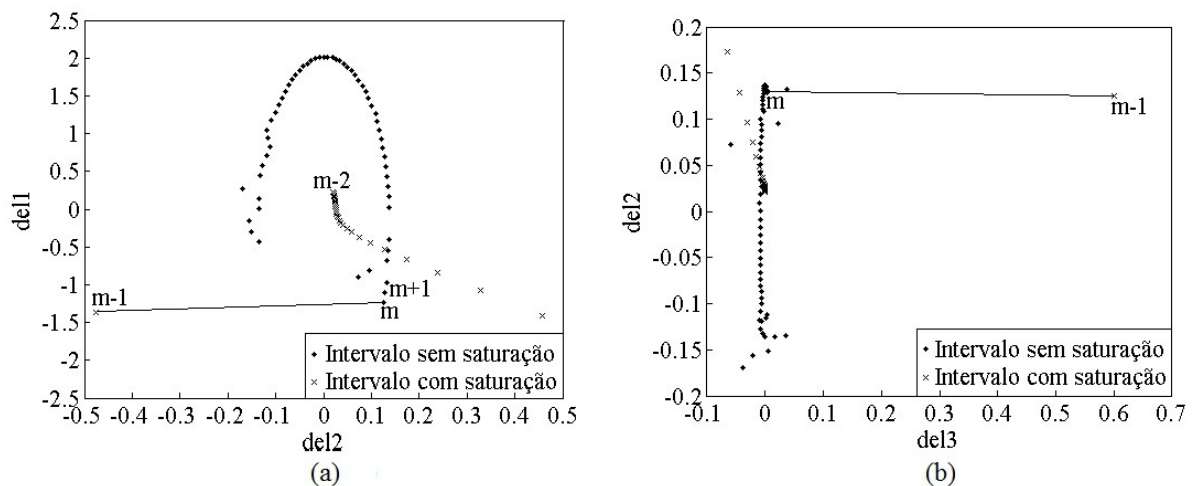


Figura 3.16 – Planos del2 x del1 e del3 x del2 poucas amostras após o instante em que termina o efeito da saturação do TC. (a) Plano del2 x del1. (b) Plano del3 x del2.

A distância entre dois pontos consecutivos em cada plano pode ser obtida facilmente pelo teorema de Pitágoras. As equações (3.22), (3.23) e (3.24) calculam os valores da distância euclidiana entre o ponto atual  $n$  e o ponto anterior  $n-1$  nos planos del1 x  $i_2$ , del2 x del1 e del3 x del2, respectivamente.

$$\text{dist1}(n)^2 = [\text{del1}(n) - \text{del1}(n - 1)]^2 + [i_2(n) - i_2(n - 1)]^2 \quad (3.22)$$

$$\text{dist2}(n)^2 = [\text{del2}(n) - \text{del2}(n - 1)]^2 + [\text{del1}(n) - \text{del1}(n - 1)]^2 \quad (3.23)$$

$$\text{dist3}(n)^2 = [\text{del3}(n) - \text{del3}(n - 1)]^2 + [\text{del2}(n) - \text{del2}(n - 1)]^2 \quad (3.24)$$

O início de saturação é detectado quando as condições descritas em (3.25) forem satisfeitas.

$$\text{dist2}(n) > A1 \text{ e } \text{dist3}(n) > A2 \quad (3.25)$$

Obviamente, os valores dos ajustes  $A1$  e  $A2$  são dependentes da taxa de amostragem. Quanto menor essa taxa, maiores os valores das funções-diferença e, conseqüentemente, maiores os valores das distâncias entre pontos consecutivos em cada plano. Por outro lado, menores são esses valores quanto maior a taxa de amostragem. Ambos os extremos podem comprometer o desempenho do método. Foram testadas amostragens de 32, 64 e 96 amostras/ciclo. A metodologia apresentou menor capacidade de detecção para a amostragem de 32 amostras/ciclo. Para 64 e 96 amostras/ciclo, os resultados foram semelhantes para os mesmos ajustes de  $A1$  e  $A2$ .

Os resultados mostrados no Capítulo 4 foram obtidos para uma amostragem de 96 amostras/ciclo. Os valores de A1 e A2 foram obtidos empiricamente e fixados em 0,15 e 0,2, respectivamente. O fato de A2 ser maior do que A1 deve-se a maior variação do valor das distâncias no plano del3 x del2.

O fim da saturação é determinado assim que as condições descritas em (3.25) não forem mais satisfeitas para pelo menos dois valores consecutivos de dist2 e dist3 após um novo incremento nesses valores. Sendo assim, dist2 e dist3 terão valores menores que A1 e A2, identificando o retorno dos pontos à trajetória anterior à saturação. A condição para a detecção do fim de um intervalo de saturação é descrita em (3.26).

$$\left[ \begin{array}{l} \text{dist2}(n) < A1 \\ \text{dist2}(n + 1) < A1 \end{array} \right] \text{ e } \left[ \begin{array}{l} \text{dist3}(n) < A2 \\ \text{dist3}(n + 1) < A2 \end{array} \right] \quad (3.26)$$

Assim que a condição descrita em (3.25) for satisfeita, o valor do detector muda de zero para um e permanece com esse valor até que o final do intervalo seja detectado.

Em alguns casos, a oscilação numérica do valor das distâncias é grande logo após o início da saturação. Para que essa oscilação não seja interpretada como um possível fim de saturação, um pequeno intervalo de tempo, equivalente a algumas amostras é aguardado para que então se inicie a busca pelo fim da saturação. Nos casos estudados esse atraso é de 10 amostras.

O valor das distâncias volta a satisfazer as condições em (3.25) assim que o fim do intervalo de saturação se aproxima. Enquanto (3.25) for satisfeita, as amostras devem ser consideradas como pertencentes ao intervalo de saturação. Dessa forma, o fim de saturação ocorrerá somente quando as distâncias associadas à amostra n voltarem a ter valores inferiores aos ajustes A1 e A2 para pelo menos duas amostras consecutivas (3.26). Quando isso ocorre, é atribuído o valor zero ao detector.

A Figura 3.17 ilustra o funcionamento da metodologia.

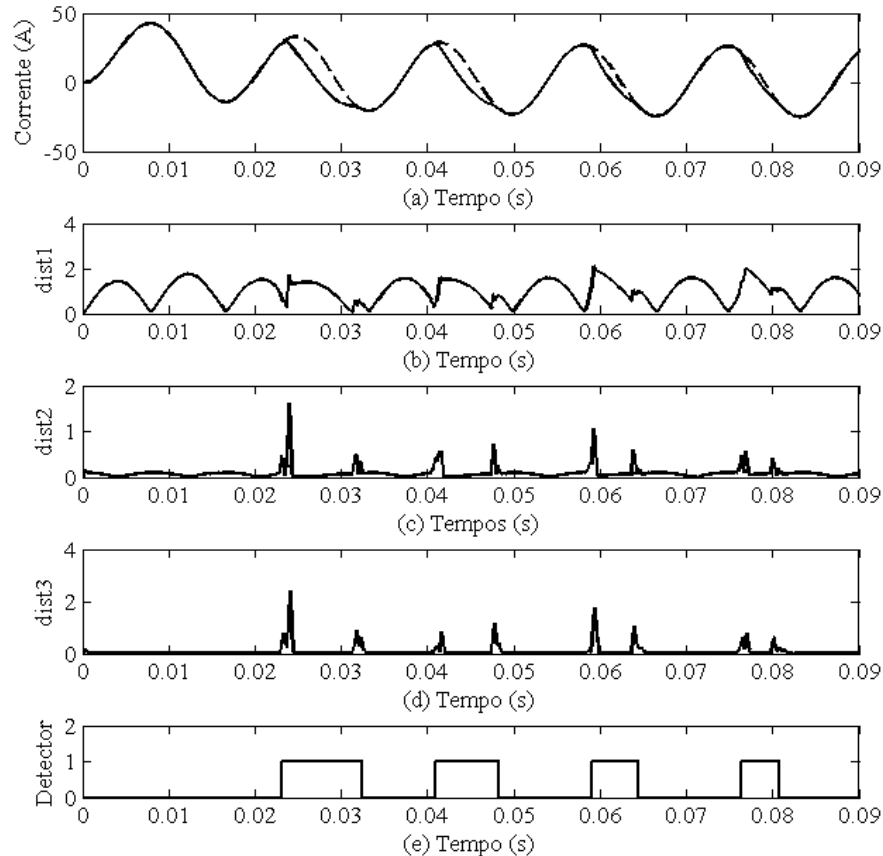


Figura 3.17 – Detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença. (a) Sinal de corrente secundária ideal (tracejada) e distorcida. (b) Valores das distâncias no plano  $del_1 \times i_2$ . (c) Valores das distâncias no plano  $del_2 \times del_1$ . (d) Valores das distâncias no plano  $del_3 \times del_2$ . (e) Detector de saturação.

### 3.4 Técnicas de Correção

#### 3.4.1 Correção dos Intervalos de Saturação por Mínimos Quadrados

PAN *et al.* (2004) propuseram uma metodologia para correção dos efeitos da saturação fundamentada na técnica de Ajuste de Curvas por Mínimos Quadrados. Tal metodologia assume que a porção não distorcida da forma de onda, antes do primeiro trecho distorcido, tem duração mínima de  $1/6$  de ciclo. Também foi considerado que o trecho não distorcido entre dois intervalos de saturação consecutivos tem duração de aproximadamente  $1/4$  de ciclo.

Além disso, os autores afirmam que, a partir da segunda porção não distorcida da forma de onda, existem pontos que se repetirão exatamente um ciclo após sua ocorrência. As partes não saturadas do sinal podem ser determinadas usando um ponto de referência (RP), o qual é definido logo após a incidência da falta. O RP é definido como a primeira amostra da corrente de falta após a passagem pelo zero, onde a forma de onda da corrente de falta tem a mesma direção da componente exponencial decrescente.

A primeira porção não saturada da forma de onda é aquela que inclui o RP e as amostras consecutivas imediatamente após este ponto, enquanto as demais porções não distorcidas do sinal contêm amostras consecutivas um ou mais ciclos após o RP. Os autores afirmam que qualquer porção da forma de onda não distorcida por saturação dura em torno de 1/6 a 1/4 de ciclo e pode ou não ser simétrica ao RP, ou a um ponto a partir do RP, por um número inteiro de ciclos.

Para compensação do sinal distorcido, a corrente de falta é expressa por uma combinação de duas componentes. A primeira representa a componente periódica de regime permanente determinada pela fonte de tensão e a impedância de falta. A segunda componente representa a parcela exponencial que irá desaparecer por decaimento de acordo com a constante de tempo ( $X/R$ ) do sistema de potência.

Sendo assim, a Equação (3.27) deve ser satisfeita para qualquer ponto de um trecho não saturado da forma de onda da corrente de falta.

$$I_k = A \cos\left(2\pi k \frac{f}{f_{\text{samp}}} + \varphi\right) + B e^{\lambda k} \quad (3.27)$$

Em (3.27),  $f_{\text{samp}}$  é a frequência de amostragem e  $f$  é a frequência do sistema de potência.  $A$ ,  $B$ ,  $\varphi$  e  $\lambda$  são parâmetros desconhecidos. Teoricamente, esses parâmetros definem toda a forma de onda da corrente de falta e, por isso, podem ser usados para calcular valores de corrente para compensação dos trechos distorcidos por saturação.

Valores numéricos para  $A$ ,  $B$ ,  $\varphi$  e  $\lambda$  podem ser estimados por meio do Método de Ajuste de Curvas por Mínimos Quadrados, desde que as amostras sejam extraídas das porções não saturadas do sinal.

A Equação (3.27) pode ser reescrita como (3.28) pela expansão do termo cosseno e pela aproximação de primeira ordem da Série de Taylor para a função exponencial.

$$I_k = (A \cos \varphi) \cos \omega k + (-A \sin \varphi) \sin \omega k + B + \lambda k \quad (3.28)$$

Em (3.28),  $\omega$  é a frequência angular e representa  $2\pi f/f_{\text{samp}}$ . Fazendo  $C_1 = (A \cos \varphi)$  e  $C_2 = (-A \sin \varphi)$ , a Equação (3.28) pode ser reescrita como (3.29).

$$I_k = C_1 \cos \omega k + C_2 \sin \omega k + B + \lambda k \quad (3.29)$$

A Equação (3.30) é formada por amostras retiradas de dois trechos não saturados consecutivos e anteriores ao respectivo trecho saturado.

$$\begin{bmatrix} \cos \omega(k_i) & \text{sen } \omega(k_i) & k_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \omega(k_i + m_i) & \text{sen } \omega(k_i + m_i) & k_i + m_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \omega(k_j) & \text{sen } \omega(k_j) & k_j & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \omega(k_j + m_j) & \text{sen } \omega(k_j + m_j) & k_j + m_j & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \lambda \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(k_i) \\ \vdots \\ I(k_i + m_i) \\ \vdots \\ I(k_j) \\ \vdots \\ I(k_j + m_j) \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Em (3.30), as amostras da primeira região não saturada da forma de onda são numeradas como  $k_i$  até  $k_i + m_i$  e as amostras da segunda região não saturada são numeradas como  $k_j$  até  $k_j + m_j$ .

A Equação (3.30) pode ser expressa por (3.31), onde  $M$  representa a matriz de senos e cossenos,  $P$  o vetor com os parâmetros desconhecidos e  $I$ , o vetor com as amostras de corrente das respectivas regiões não distorcidas pela saturação. Os valores de  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda$  e  $B$  podem ser obtidos através da Equação (3.32), onde a parcela  $(M^T M)^{-1} M^T$  representa a pseudo-inversa da matriz  $M$  e  $T$ , o operador matriz transposta.

$$MP = I \quad (3.31)$$

$$P = (M^T M)^{-1} M^T I \quad (3.32)$$

Após a obtenção dos valores de  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda$  e  $B$ , as possíveis amostras de um trecho saturado podem ser substituídas por valores estimados a partir da Equação (3.29).

A compensação utilizando dois trechos não saturados do sinal, consecutivos e anteriores a cada intervalo distorcido, pode ser feita usando todas as amostras dos respectivos trechos não saturados ou usando somente uma parte dessas amostras. Essa alternativa não permite a correção do primeiro intervalo distorcido por saturação. Entretanto, o primeiro trecho distorcido pode ser compensado utilizando apenas o primeiro trecho não saturado. Nos testes, as duas aplicações foram testadas, utilizando dez amostras de cada trecho não saturado para uma amostragem de 96 amostras/ciclo.

Os autores afirmam que, para uma compensação com maior precisão, mais do que dois trechos não saturados devem ser usados. Entretanto, essa alternativa não foi testada.

Outras duas aplicações dessa técnica de correção também foram testadas junto a detectores de saturação. A primeira, utilizando somente pontos anteriores a cada intervalo de saturação, o que permite a compensação do sinal durante o referido intervalo. Como o erro para a estimação dos parâmetros nessa aplicação é maior, uma lógica foi desenvolvida para descartar os valores calculados durante a correção que sejam inferiores às amostras do sinal original, mantendo os valores amostrados caso isso ocorra.

A segunda aplicação usa todos os pontos anteriores e cinco amostras posteriores a cada intervalo distorcido, preenchendo assim a matriz e o vetor de corrente descritos na Equação (3.30) para obtenção dos parâmetros desconhecidos  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda$  e  $B$ . Dessa forma, os trechos distorcidos são compensados logo após a detecção do fim do respectivo intervalo de saturação. Por isso, essa metodologia de compensação terá atraso equivalente à duração do intervalo de saturação mais cinco amostras.

Nessas duas aplicações, a combinação com uma técnica de detecção permite que boa parte da informação presente no sinal original de corrente secundária seja preservada, diminuindo assim o erro transitório da correção.

### **3.4.2 Correção dos Intervalos de Saturação Utilizando Técnica de Regressão**

LI *et al.* (2002) propuseram uma técnica de regressão para compensação dos intervalos distorcidos pela saturação do TC. A Equação (3.33) representa o comportamento da corrente de falta que flui no primário de um TC instalado em uma linha de transmissão. Essa corrente resulta da superposição entre a componente senoidal e a componente exponencial.

$$i(t) = i_{\text{exp}}(t) + i_{\text{sen}}(t) = Ce^{-\alpha t} + C_4 \text{sen } \phi_t \quad (3.33)$$

Em (3.33),  $i$  representa a corrente de falta,  $t$  é o tempo,  $i_{\text{exp}}$  é a componente exponencial,  $i_{\text{sen}}$  é a componente senoidal,  $\alpha$  é o coeficiente de decaimento da componente exponencial,  $\phi_t$  é ângulo de fase no instante  $t$ ,  $C$  é o valor inicial da componente exponencial e  $C_4$  é a amplitude da componente senoidal.

Uma vez que o trecho distorcido da forma de onda seja distinguido do trecho não saturado, é possível usar uma técnica de regressão para compensar as seções do sinal afetadas pela saturação do TC, utilizando amostras dos trechos não saturados do sinal. A regressão é uma técnica que utiliza o método de ajuste de curvas por mínimos quadrados, de forma similar a metodologia descrita na Seção 3.4.1, porém utilizando amostras dos trechos não saturados imediatamente anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação.

Segundo LI *et al.* (2002), a componente exponencial  $e^{-\alpha t}$  em (3.33) pode ser representada por um polinômio que corresponde a aproximação da série de Taylor para a função exponencial, conforme (3.34).

$$e^{-\alpha t} = 1 - \alpha t + \frac{(\alpha t)^2}{2} - \frac{(\alpha t)^3}{2 \times 3} + \dots \quad (3.34)$$

Sabe-se que a aproximação de terceira ordem da série de Taylor tem precisão satisfatória e que os termos de maior ordem não alteram significativamente os resultados, podendo ser desprezados. Sendo assim, a parcela exponencial da corrente de falta em (3.33) pode ser expressa por (3.35).

$$i_{\text{exp}}(t) = C e^{-\alpha t} \cong C \left[ 1 - \alpha t + \frac{(\alpha t)^2}{2} - \frac{(\alpha t)^3}{2 \times 3} \right] = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3 \quad (3.35)$$

Em (3.35),  $C_0 = C$ ,  $C_1 = -\alpha t$ ,  $C_2 = C\alpha^2/2$ ,  $C_3 = -C\alpha^3/6$ .  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são coeficientes desconhecidos que devem ser obtidos a partir da técnica de regressão. A variável  $t$  pode ser substituída pelo número correspondente a amostra  $n$ , resultando em (3.36).

$$i_{\text{exp}}(n) = C_0 + C_1 n + C_2 n^2 + C_3 n^3 \quad (3.36)$$

A componente senoidal pode ser reescrita como (3.37), onde  $C_4$  é mais um parâmetro desconhecido a ser determinado pela técnica de regressão.

$$i_{\text{sen}}(n) = C_4 \text{sen } \phi_n \quad (3.37)$$

Em (3.37),  $\phi_n$  representa o ângulo de fase da amostra  $n$ . Os autores afirmam que, por convenção, se o ângulo de fase do primeiro ponto for utilizado como referência, os ângulos de fase dos pontos consecutivos podem ser facilmente obtidos. Entretanto, afirmam que é difícil determinar, em tempo real, o ângulo de fase inicial da corrente de falta. Por esse motivo, outro ponto deve ser selecionado como referência. O primeiro vale ou pico da forma de onda do sinal, imediatamente após um intervalo de saturação, deve ser escolhido como ponto de referência. A esse ponto é atribuído ângulo de fase igual a  $\pi/2$ . Se o ponto de referência for um vale, o sinal de  $C_4$  e  $i_{\text{sen}}(n)$  em (3.37) é negativo, do contrário, o sinal será positivo.

Supondo que a corrente secundária é amostrada por  $S_R$  amostras/ciclo, o intervalo de ângulo de fase entre amostras consecutivas será  $2\pi/S_R$ . O ângulo de fase da amostra  $n$  pode ser calculado por (3.38).

$$\phi_n = \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi(n_{\pi/2} - n)}{S_R} \quad (3.38)$$

Em (3.38),  $n_{\pi/2}$  representa o número da amostra correspondente ao ponto de referência. A Figura 3.18 ilustra o processo de determinação dos ângulos de fase das respectivas amostras.

A superposição entre a componente exponencial e a componente senoidal resulta na Equação (3.39), que representa o comportamento aproximado da corrente de falta.

$$i(n) = C_0 + C_1 n + C_2 n^2 + C_3 n^3 + C_4 \sin \phi_n \quad (3.39)$$

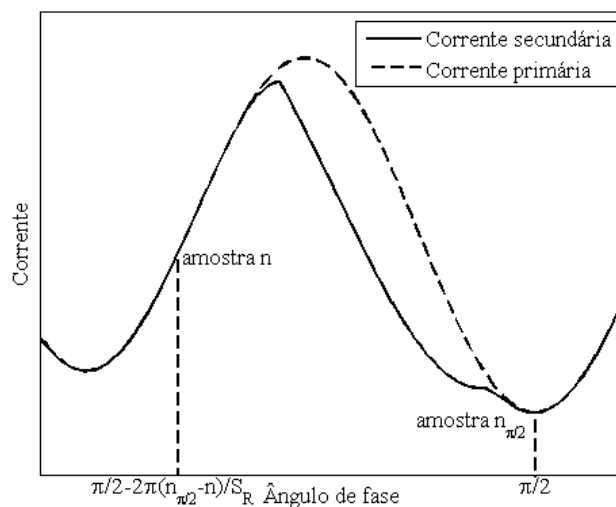


Figura 3.18 – Ângulo de fase da  $n$ ésima amostra.

Em (3.39),  $\phi_n$  é calculado por meio da Equação (3.38),  $n$  é o número atribuído ao respectivo valor de corrente no processo de amostragem e  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  são os coeficientes a serem calculados de forma análoga ao processo descrito na Seção 3.4.1 (Equações 3.31 e 3.32). Pontos dos trechos não distorcidos imediatamente antes e depois de cada intervalo de saturação são utilizados no processo de obtenção dos valores de  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$ . A equação a ser resolvida para esse cálculo é descrita em (3.40).



$$\begin{bmatrix} 1 & (n-j) & (n-j)^2 & (n-j)^3 & \text{sen } \phi_{(n-j)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & n & n^2 & n^3 & \text{sen } \phi_n \\ 1 & n_{\pi/2} & n_{\pi/2}^2 & n_{\pi/2}^3 & \text{sen } \phi_{n_{\pi/2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & (n_{\pi/2} + k) & (n_{\pi/2} + k)^2 & (n_{\pi/2} + k)^3 & \text{sen } \phi_{(n_{\pi/2} + k)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(n-j) \\ \vdots \\ i(n) \\ i(n_{\pi/2}) \\ \vdots \\ i(n_{\pi/2} + k) \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Na Equação (3.40),  $(n-j)$  até  $n$  representam as amostras anteriores ao intervalo de saturação, onde  $n$  é a última amostra do trecho não saturado. As amostras posteriores ao intervalo de saturação são representadas por  $n_{\pi/2}$  até  $(n_{\pi/2}+k)$ , onde  $n_{\pi/2}$  é a amostra utilizada como ponto de referência. O número de amostras antes e depois de cada intervalo de saturação depende da taxa amostragem do sistema. Nos testes realizados, foram utilizadas vinte amostras anteriores e cinco posteriores a cada trecho distorcido, contadas a partir do ponto de referência, para uma amostragem de 96 amostras/ciclo.

### 3.4.3 Correção dos Intervalos de Saturação por Corrente de Magnetização

A proposta de KANG *et al.* (2004b) pode ser facilmente entendida por meio da Figura 3.19. A partir dessa figura percebe-se que a corrente primária do TC, referida ao secundário, pode ser expressa pela Equação (3.41)

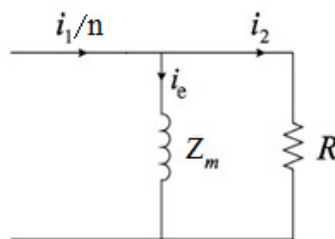


Figura 3.19 – Circuito simplificado do transformador de corrente.

$$\frac{i_1}{n} = i_e + i_2 \quad (3.41)$$

Na Equação (3.41),  $i_1/n$  representa a corrente que flui através do primário do TC referida ao secundário,  $i_2$  é a corrente que flui através do terminal secundário e  $i_e$  representa a corrente de excitação do núcleo. Essa equação garante que, se o valor de  $i_e$  for estimado para cada valor de  $i_2$ , então o valor de  $i_1/n$  correspondente pode ser calculado. Sendo assim, utilizando essa idéia durante os intervalos distorcidos pela saturação, a forma de onda do terminal secundário pode ser corrigida.

O valor de  $i_e$  pode ser estimado por meio do fluxo magnético  $\lambda(t)$  que está relacionado com  $i_2(t)$  por (3.42).

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = Ri_2(t) \quad (3.42)$$

Integrando (3.42) de  $t_0$  até  $t$ , tem-se (3.43):

$$\lambda(t) - \lambda(t_0) = R \int_{t_0}^t i_2(t) dt \quad (3.43)$$

Se o valor do fluxo inicial  $\lambda(t_0)$  for conhecido,  $\lambda(t)$  pode ser calculado em (3.43). Calculando a segunda derivada conforme (3.44) e aplicando esse valor vezes menos um na curva de magnetização do TC, obtém-se o valor de  $\lambda(t_0)$ . As Figuras. 3.20 e 3.21 exemplificam esse processo.

$$\text{del}2(m+1) = i_{22}(m+1) - 2i_{22}(m) + i_{21}(m-1) \quad (3.44)$$

Em (3.44),  $i_{21}$  representa os pontos fora do intervalo de saturação e  $i_{22}$ , os pontos da região distorcida.

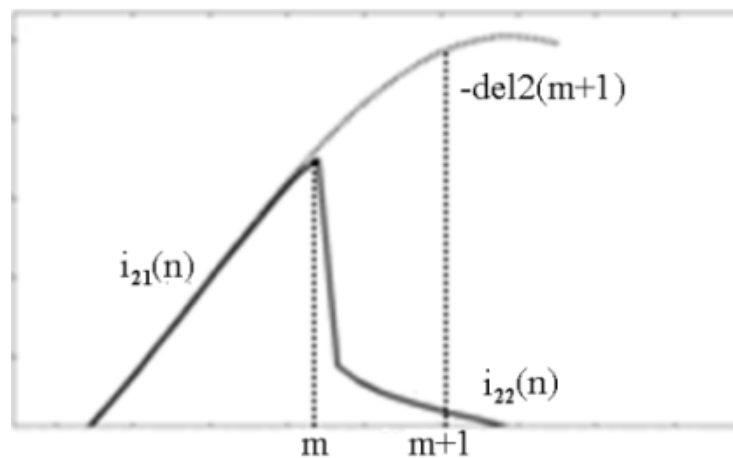


Figura 3.20 – Corrente secundária e segunda derivada.

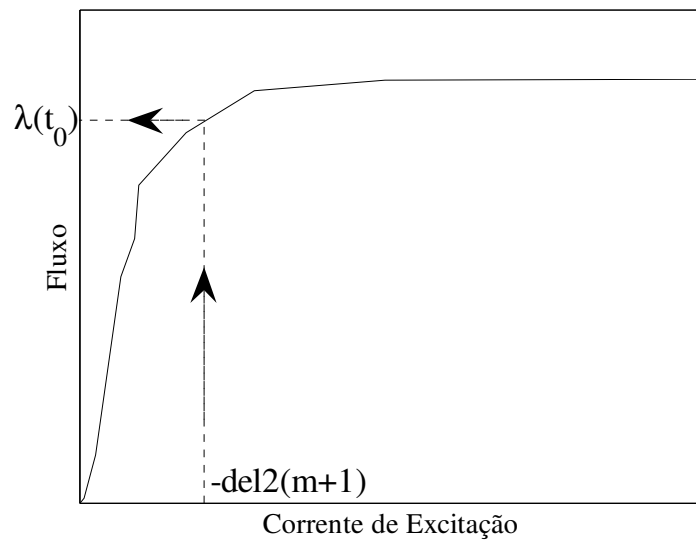


Figura 3.21 – Estimativa do Fluxo inicial.

Em seguida, são calculados os valores de  $\lambda(t)$ . Cada valor de fluxo é associado a um valor de corrente de excitação através da curva de magnetização (Figura 3.22). Finalmente, a compensação é realizada por meio da soma de  $i_e(t)$  ao seu respectivo  $i_2(t)$ , ponto a ponto, conforme (3.41).

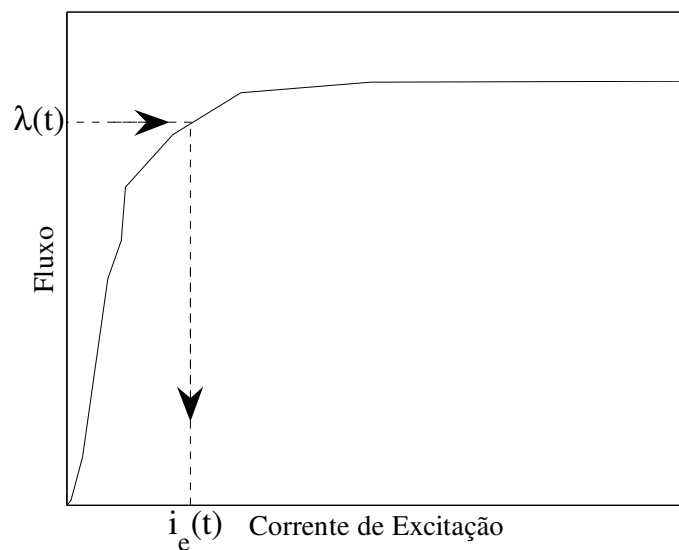


Figura 3.22 – Estimativa da corrente de magnetização.

O método de correção começa a ser processado no instante em que um início de saturação é detectado, ou seja, quando o valor do detector muda de zero para um, e termina quando o fim do respectivo intervalo de saturação é determinado.

### **3.5 Considerações Finais**

Diversas metodologias para detecção e correção dos sinais distorcidos em virtude da saturação dos TCs foram sugeridas ao longo dos anos. Algumas destas, foram implementadas e discutidas no presente capítulo. Além disso, foram sugeridas novas técnicas para detecção e diferentes aplicações para a metodologia de correção dos intervalos de saturação por Mínimos Quadrados (PAN *et al.*, 2004).

Além da proposta de PAN *et al.* (2004), as seguintes combinações entre técnicas de detecção e compensação foram analisadas:

- Detecção por Transformada Wavelet Discreta (Seção 3.2.1) e Correção por Técnica de Regressão (Seção 3.4.2);
- Detecção a partir da Terceira Função-Diferença do sinal (Seção 3.2.2) e Correção por corrente de magnetização (Seção 3.4.3);
- Detecção por Morfologia Matemática (Seção 3.2.3) e Correção por Mínimos Quadrados, utilizando pontos antes de depois de cada intervalo de saturação;
- Detecção por Ângulos entre diferenças consecutivas do sinal de corrente (Seção 3.3.1) e Correção por Mínimos Quadrados, utilizando pontos antes de depois de cada intervalo de saturação;
- Detecção por Terceira Derivada (Seção 3.3.2) e Correção por Mínimos Quadrados, utilizando pontos antes de depois de cada intervalo de saturação;
- Detecção pela Distância Entre Pontos nos Planos Formados pelas Amostras de Corrente e suas Funções-Diferença (Seção 3.3.3) e Correção por Mínimos Quadrados, utilizando somente pontos antes de cada intervalo de saturação;
- Detecção pela Distância Entre Pontos nos Planos Formados pelas Amostras de Corrente e suas Funções-Diferença (Seção 3.3.3) e Correção por Mínimos Quadrados, utilizando pontos antes e depois de cada intervalo de saturação;

Vale ressaltar que as metodologias de detecção e correção podem ser combinadas aleatoriamente entre si, não sendo obrigatórias as associações analisadas neste trabalho.

Além disso, os resultados obtidos para cada combinação de técnicas são mostrados no Capítulo seguinte. 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 a amostradores modernos de alta taxa de aquisição de dados.

## Capítulo 4

# RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Considerações Gerais

Conhecer as características dos métodos de detecção e compensação dos efeitos da saturação é de fundamental importância para a escolha do mais adequado. Nesse capítulo, são realizados testes envolvendo as metodologias descritas no Capítulo 3. Os métodos são comparados por meio de simulações computacionais de curto-circuito em uma linha de transmissão.

Durante o estudo, verificou-se que alguns intervalos de saturação têm seus finais não detectados, onde as distorções são de pouca relevância. Por isso, uma lógica que atribui zeros ao detector, quando o tempo máximo permitido para detecção dos respectivos fins é atingido, foi associada a todas as metodologias de detecção. Dessa forma, garante-se a atuação coerente dessas técnicas. Além disso, o tempo máximo permitido para detecção dos finais de saturação foi fixado como equivalente a  $\frac{3}{4}$  de ciclo.

Um sistema teste foi selecionado para discussão dos resultados. Também, uma análise qualitativa é realizada de modo a destacar as vantagens e desvantagens de cada método.

### 4.2 Sistema teste

Todas as metodologias foram implementadas no Matlab<sup>®</sup>. Os sinais analisados foram obtidos por simulações no EMTP-ATP, seguindo o sistema da Figura 4.1.

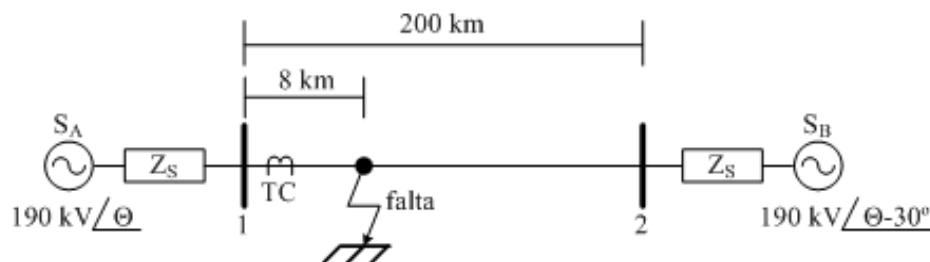


Figura 4.1 - Sistema teste.

A frequência do sistema é igual a 60 Hz.  $S_A$  e  $S_B$  representam os geradores equivalentes, cujas impedâncias de sequência zero ( $Z_{S0}$ ) e de sequência positiva ( $Z_{S1}$ ) são

iguais a  $3,681 + j24,515 \Omega$  e  $0,819 + j7,757 \Omega$ , respectivamente. O valor eficaz de tensão das fontes é de 190 kV e o ângulo de  $S_B$  está atrasado 30 graus em relação ao ângulo de  $S_A$ . O comprimento total da linha de transmissão é de 200 km. A linha tem impedância de seqüência zero  $Z_{L0} = 0,1841 + j1,2258 \Omega/\text{km}$  e impedância de seqüência positiva  $Z_{L1} = 0,041 + j0,3878 \Omega/\text{km}$ . A saturação do TC é simulada para uma falta a 8 km da barra 1. A frequência de amostragem é de 5760 Hz (96 amostras/ciclo).

KEZUNOVIC *et al.* (1994) descrevem o modelo do transformador saturável empregado nas simulações. A relação de transformação 2000:5 para um TC C400 foi escolhida para os estudos. A resistência e a indutância do secundário do transformador de corrente são, respectivamente, 0,5  $\Omega$  e 0,8 mH. Foram realizadas simulações com carga de 4 ohms puramente resistiva e com fator de potência 0,5 indutivo. Simulações com carga de 10  $\Omega$ , puramente resistiva, também foram realizadas.

Como o fluxo remanescente foi considerado, o ramo de magnetização do TC foi representado por um indutor não-linear Tipo-96, o qual necessita de uma característica de histerese. Essa característica foi gerada usando a função HYSDAT, um programa auxiliar do EMTP, para 2,05 A e 1,51 V como joelho da curva.

Foram simuladas faltas monofásicas para cada carga. Cada falta foi simulada com fluxo remanescente de zero e 80%. Faltas trifásicas também foram analisadas para uma carga puramente resistiva de 4 ohms. Todos os resultados foram obtidos para a fase A do sistema.

O erro transitório foi calculado conforme (4.1), onde  $n$  é a relação de transformação,  $i'_2$  é a corrente corrigida,  $i_1$  é a corrente primária e  $I_1$  é o valor RMS da corrente primária.

$$\text{erro}(\%) = \frac{n \cdot i'_2 - i_1}{\sqrt{2} \times I_1} \times 100\% \quad (4.1)$$

Além disso, um filtro de Fourier de ciclo completo foi utilizado para obter os valores RMS dos sinais analisados e validar os resultados da compensação.

## 4.3 Casos Testados

### 4.3.1 Falta Monofásica: Carga Resistiva de 4 $\Omega$ e 0% de Fluxo Remanescente

Para este caso, a forma de onda começa a ser distorcida a partir do segundo ciclo do sinal e os efeitos da saturação são relevantes até o quinto ciclo. O valor RMS máximo da

corrente de curto-circuito é de 8256 A referidos ao primário do transformador de corrente. O valor RMS de regime permanente da corrente de curto-circuito é de aproximadamente 7216 A, também referidos ao primário do TC.

#### 4.3.1.1 Resultados para a Correção dos Intervalos de Saturação por Mínimos Quadrados

A metodologia proposta por PAN *et al.* (2004), que utiliza mínimos quadrados para estimação de parâmetros característicos do sinal de corrente, a partir de dois trechos não saturados consecutivos e anteriores a cada intervalo de saturação, apresentou excelentes resultados para a compensação desse sinal. Isso foi verificado tanto para aplicação que inicia a correção a partir do segundo ciclo do sinal, quanto para a alternativa que permite corrigir o primeiro ciclo utilizando apenas o primeiro trecho não saturado.

As Figuras 4.2 e 4.3 mostram os resultados obtidos para a correção a partir do segundo ciclo. O valor absoluto máximo do erro transitório percentual para essa aplicação foi de 5,1808% e ocorre durante o primeiro trecho distorcido do sinal. Isso pode ser visto na Figura 4.2 (b). Ainda, os valores RMS, obtidos a partir do filtro de Fourier de ciclo completo para essa metodologia, são mostrados na Figura 4.3, onde é possível verificar a boa aproximação dos valores do sinal corrigido em relação ao sinal ideal de corrente.

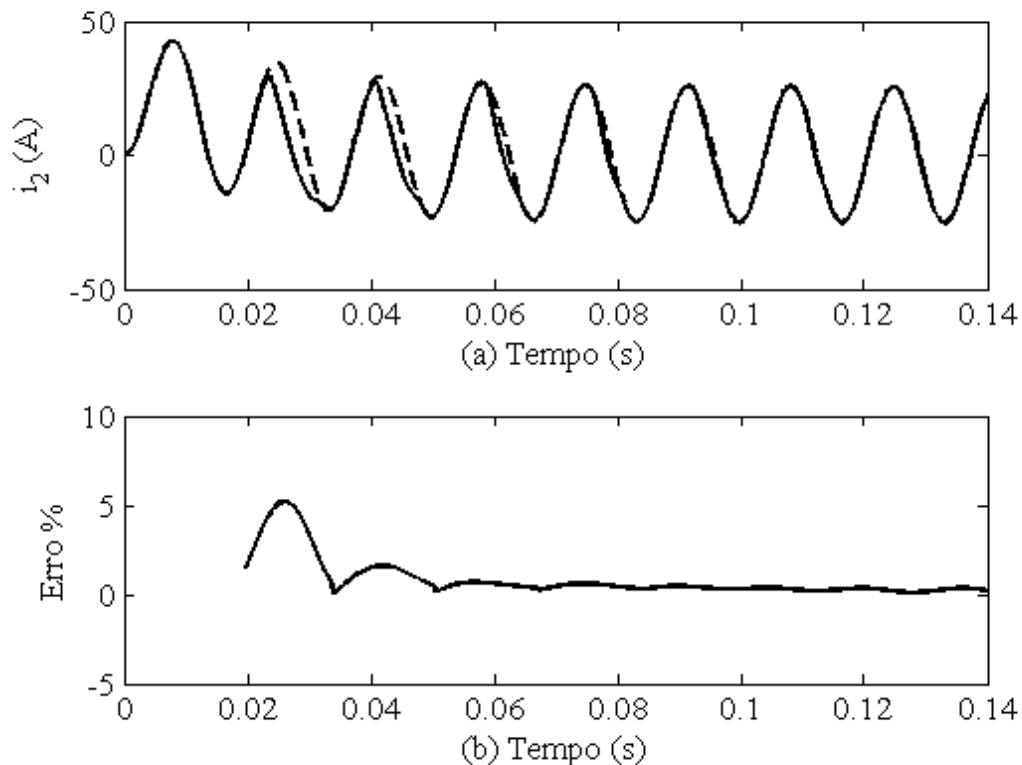


Figura 4.2 – Resultados para a correção a partir do segundo ciclo utilizando mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Erro transitório percentual.

Vale ressaltar que os valores RMS para o sinal corrigido mostrados na Figura 4.3 começam a aparecer a partir de aproximadamente 0,04 segundos por tratar-se de um filtro de Fourier de ciclo completo. Tendo em vista que o sinal começa a ser corrigido a partir do segundo ciclo, os valores RMS do sinal corrigido começam a ser calculados a partir do instante em que uma janela de dados de um ciclo é preenchida com valores do respectivo sinal.

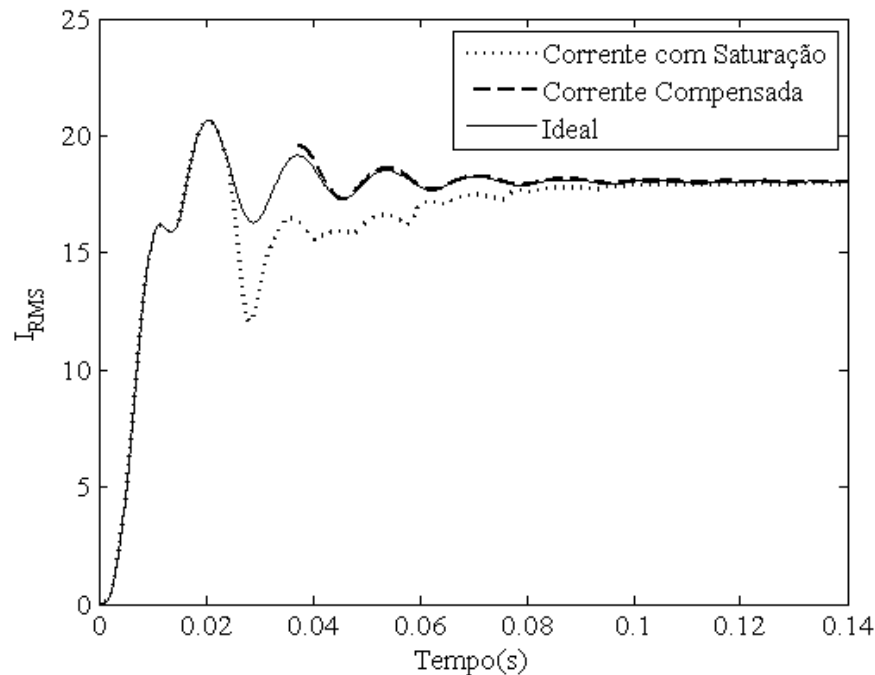


Figura 4.3 – Valores RMS para a correção a partir do segundo ciclo utilizando mínimos quadrados.

Para a aplicação que permite a correção do sinal a partir do primeiro ciclo, os resultados aparecem nas Figuras 4.4 e 4.5. O valor absoluto máximo do erro transitório percentual para essa aplicação foi de 11,5479% e acontece durante o primeiro ciclo do sinal, que é um trecho não distorcido por saturação. Esse erro ocorre porque a diferença entre o sinal corrigido e o sinal ideal aumenta, em consequência do erro durante a estimação dos parâmetros quando são utilizadas somente amostras pertencentes ao trecho não saturado anterior. Após essa situação, o erro transitório não ultrapassa 6%, o que pode ser visto na Figura 4.4 (b).

A Figura 4.5 mostra os valores RMS obtidos para essa metodologia, onde é possível verificar que o sinal corrigido teve valores RMS maiores do que o sinal ideal para o trecho entre 0,02 e 0,04 segundos. Entretanto, a aproximação entre esses sinais é bastante satisfatória.



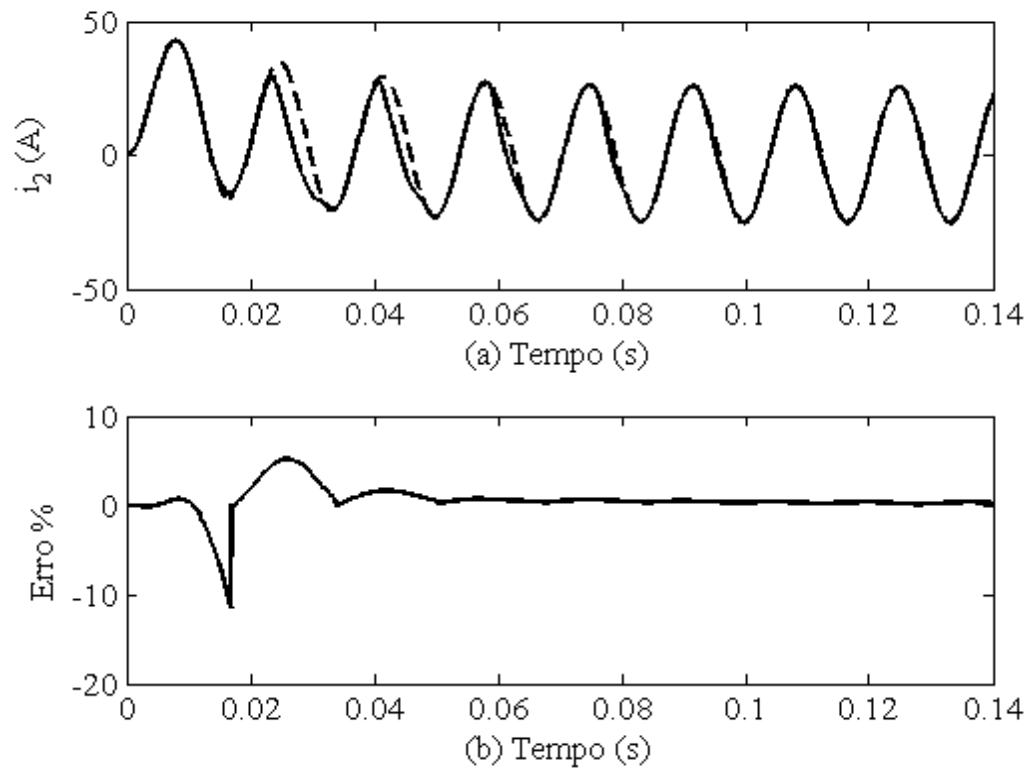


Figura 4.4 – Resultados para a correção a partir do primeiro ciclo utilizando mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Erro transitório percentual.

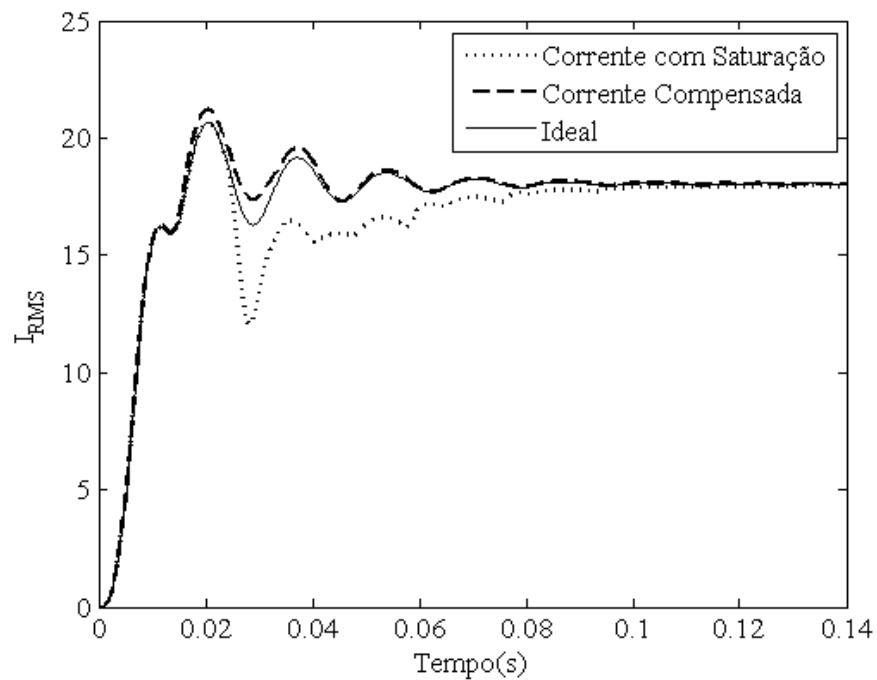


Figura 4.5 – Valores RMS para a correção a partir do primeiro ciclo utilizando mínimos quadrados.

#### 4.3.1.2 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação por Transformada Wavelet Discreta e Correção Utilizando Técnica de Regressão

A combinação entre a técnica de detecção descrita na Seção 3.2.1 e a técnica de correção descrita na Seção 3.4.2 apresentou excelentes resultados para a compensação do sinal de corrente oriundo dessa simulação. Os resultados para esse caso são mostrados nas Figuras 4.6 e 4.7.

Na Figura 4.6, o detalhe do sinal pode ser visto em (b), onde incrementos podem ser observados a partir do segundo ciclo do sinal, caracterizando os instantes referentes a início e fim dos intervalos de saturação. Além disso, pode-se verificar em (c) que os efeitos da saturação são detectados a partir do segundo ciclo até o oitavo ciclo após o início da falta.

O erro transitório percentual da correção não ultrapassou 3,2% e seu valor absoluto máximo foi de 3,1117%, ocorrido no penúltimo intervalo de saturação detectado (entre 0,1 e 0,12 segundos). Isso pode ser visto na Figura 4.6 (d).

A Figura 4.7 mostra os valores RMS obtidos para a compensação através dessa metodologia, onde é possível observar a excelente aproximação entre o sinal corrigido e o sinal ideal de corrente secundária.

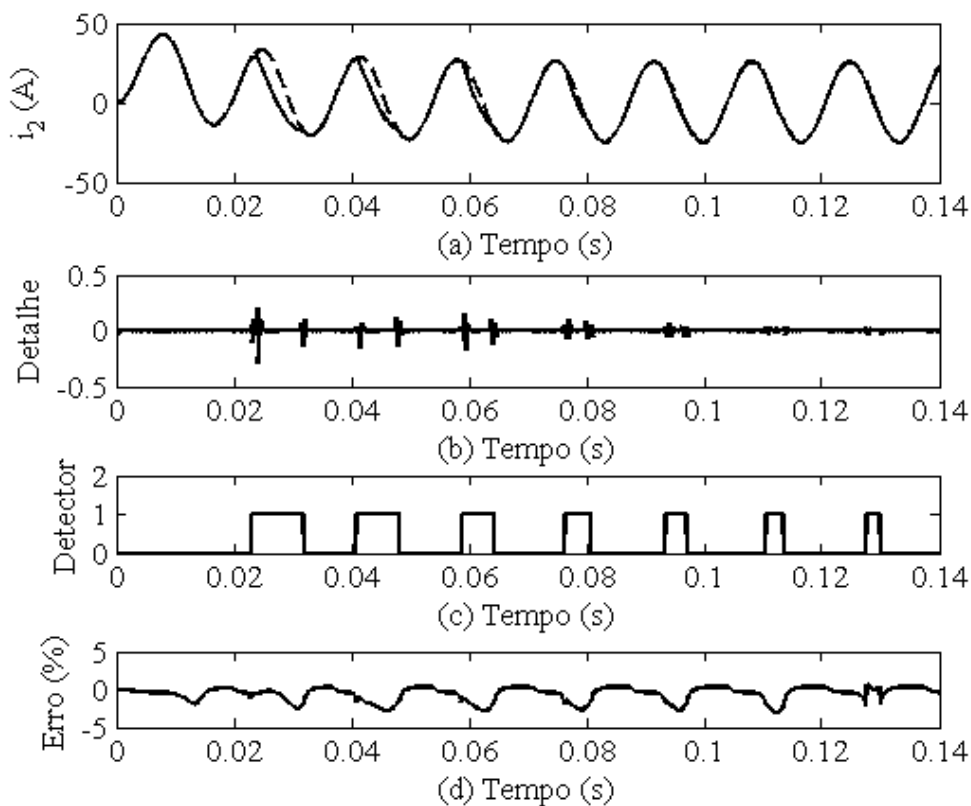


Figura 4.6 – Resultados para a combinação entre detecção por transformada wavelet e correção por técnica de regressão. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

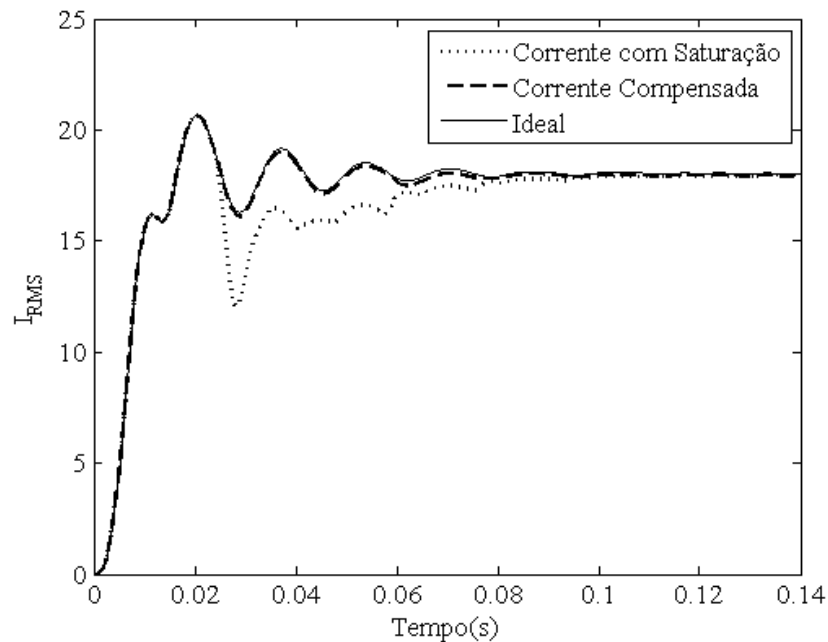


Figura 4.7 – Valores RMS para a combinação entre detecção por transformada wavelet e correção por regressão.

#### 4.3.1.3 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação a Partir das Funções-Diferença do Sinal Analisado e Correção por Corrente de Magnetização

A associação entre a metodologia de detecção descrita na Seção 3.2.2 e a técnica de correção descrita na Seção 3.4.3 obteve resultados satisfatórios para a falta monofásica, que envolvia carga de 4 ohms puramente resistiva no secundário do TC e 0% de fluxo remanescente no núcleo.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 4.8, onde os valores das funções-diferença  $del1$ ,  $del2$  e  $del3$  são mostrados em (b), (c) e (d), respectivamente. Em (e), pode-se notar que os intervalos de saturação são detectados adequadamente do segundo até o sexto ciclo. O último intervalo de saturação detectado não teve o seu final determinado. Entretanto, quando o tempo máximo permitido para detecção do fim de saturação foi atingido, atribuiu-se zero ao detector, encerrando a correção do respectivo intervalo.

O erro transitório percentual pode ser visto Na Figura 4.8 (f). O valor absoluto máximo de erro para a metodologia, durante a análise desse caso, foi de 5,9215%. Isso ocorreu durante um intervalo de saturação de pouca relevância que não foi detectado entre 0,12 e 0,14 segundos.

A Figura 4.9 mostra os valores RMS obtidos para a compensação através dessa metodologia, onde é possível observar, novamente, uma excelente aproximação entre o sinal corrigido e o sinal ideal de corrente secundária.

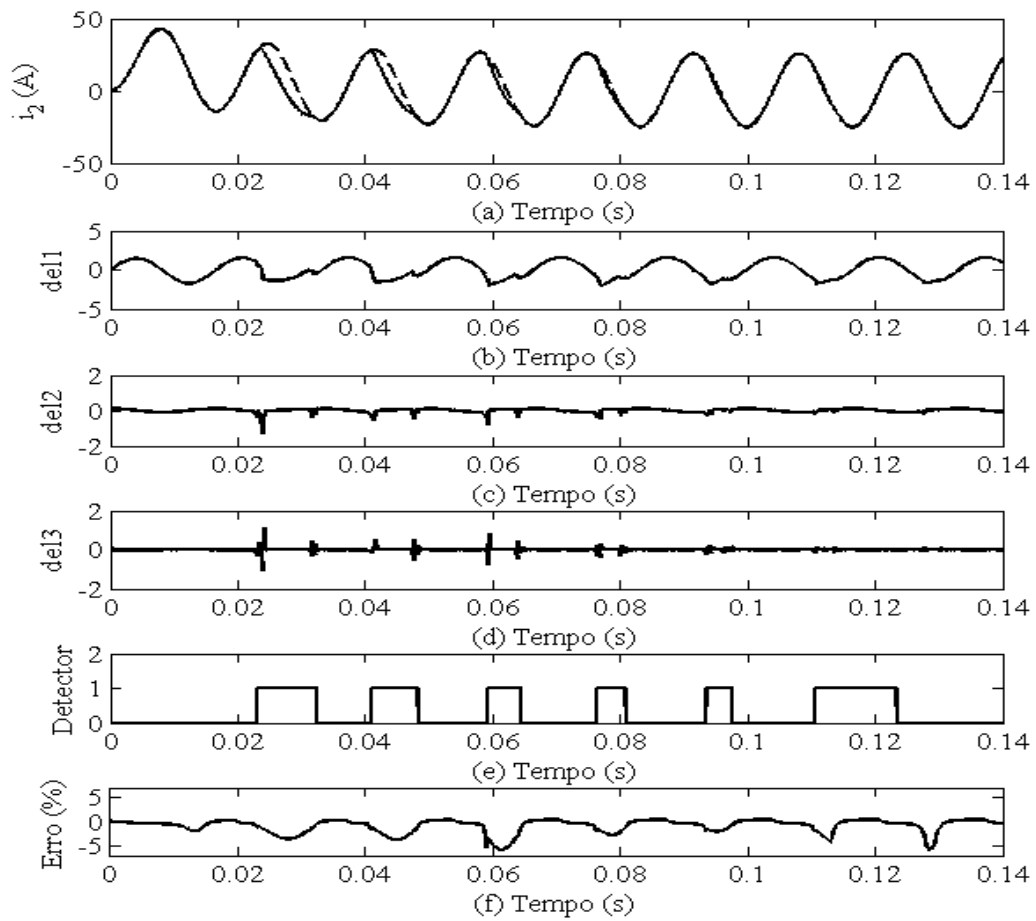


Figura 4.8 – Resultados para a combinação entre detecção através das funções-diferença e correção por corrente de magnetização. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Primeira função-diferença (del1). (c) Segunda função-diferença (del2). (d) Terceira função-diferença (del3). (e) Detector de saturação. (f) Erro transitório percentual.

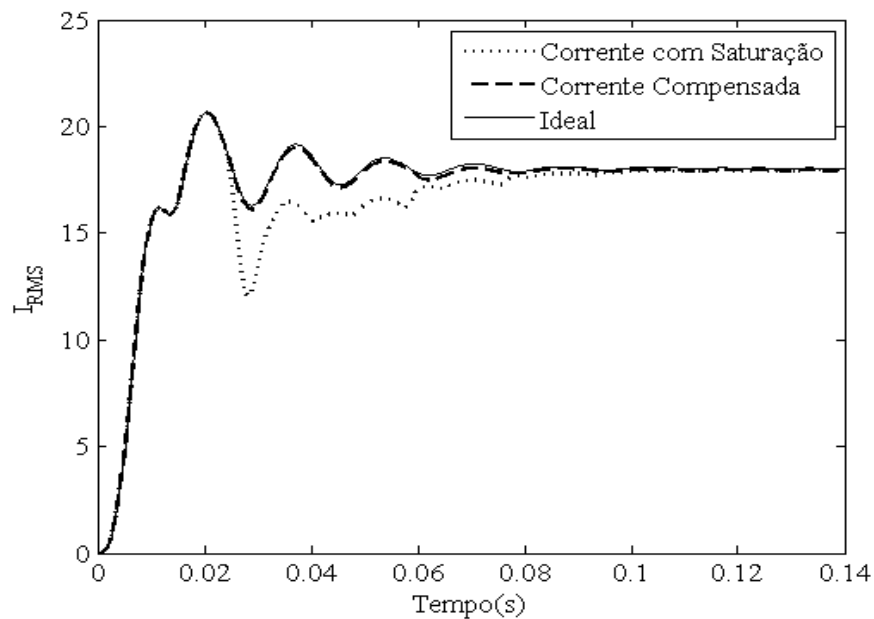


Figura 4.9 – Valores RMS para a combinação entre detecção através das funções-diferença e correção por corrente de magnetização.

#### 4.3.1.4 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação por Morfologia Matemática e Correção por Mínimos Quadrados

A metodologia de detecção por Morfologia Matemática (Seção 3.2.3) atuou corretamente, determinando de maneira precisa os intervalos de saturação presentes no sinal de corrente. O detalhe do sinal é mostrado na Figura 4.10 (b), onde é possível notar os incrementos que caracterizam início e fim dos trechos distorcidos. Foram detectadas as distorções em sete ciclos do sinal, sendo estas ocorridas a partir do segundo ciclo do mesmo. Até mesmo os intervalos de saturação de curta duração, cujas distorções são de pouca relevância, foram detectados (a partir do sexto ciclo do sinal). Isso pode ser visto na Figura 4.10 (c).

Os resultados para a correção do sinal, obtidos através da metodologia de compensação por Mínimos Quadrados descrita na Seção 3.4.1, utilizando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação, aparecem na Figura 4.10 (a). O erro transitório percentual dessa compensação aparece na Figura 4.10 (d) e seu valor absoluto máximo não ultrapassou 3,6409%.

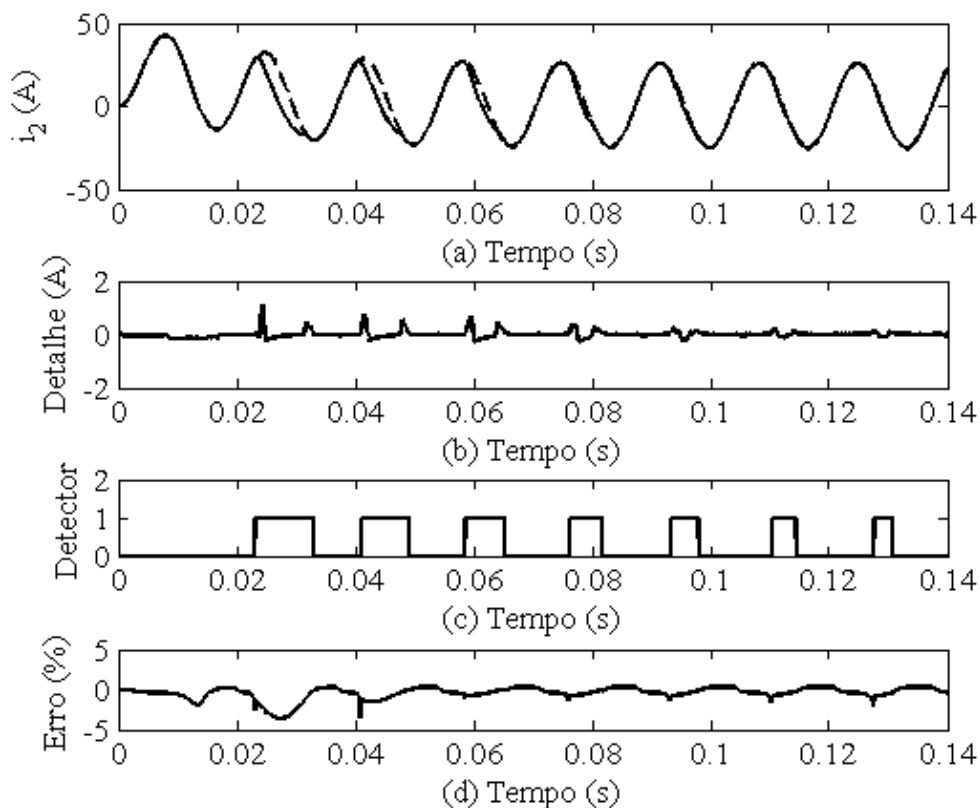


Figura 4.10 – Resultados para a combinação entre detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Detalhe do sinal obtido pela morfologia matemática. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

Além disso, a Figura 4.11 mostra os valores RMS do sinal corrigido, do sinal ideal e do sinal distorcido por saturação. Nessa Figura, pode-se notar a melhora condicionada ao sinal de corrente secundária após correção do mesmo e a excelente aproximação entre o sinal corrigido e o sinal ideal.

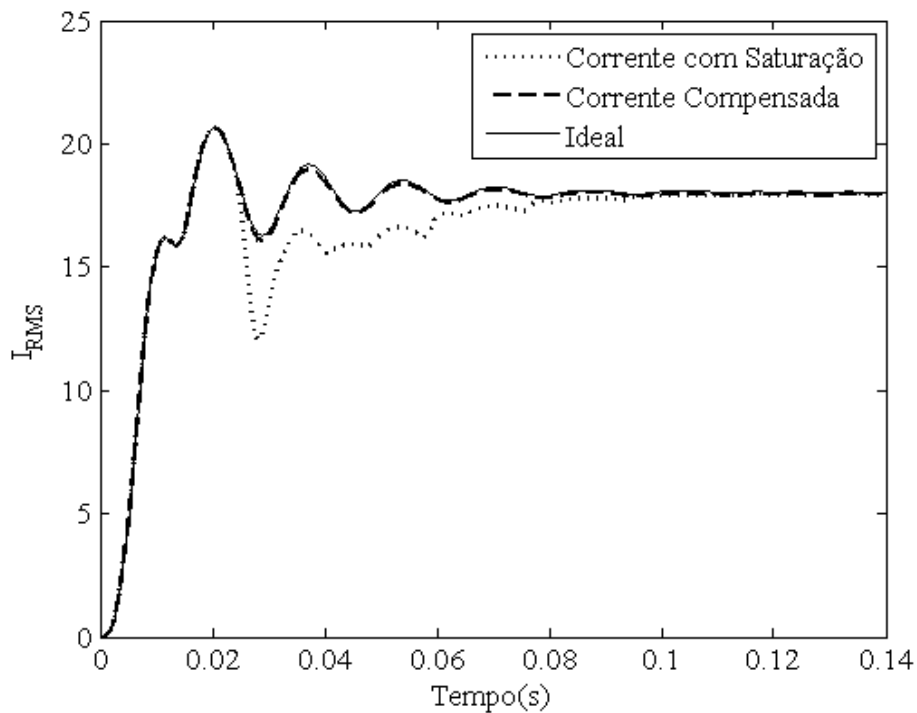


Figura 4.11 – Valores RMS para a combinação entre detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado.

#### 4.3.1.5 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação Através do Ângulo Formado entre as Diferenças do Sinal de Corrente e Correção por Mínimos Quadrados

A técnica de detecção apresentada na Seção 3.3.1 atuou coerentemente, determinando a presença de saturação em sete ciclos a partir do segundo. Entretanto, os finais dos intervalos de saturação de curta duração e distorção de pouca importância, que ocorrem a partir do sexto ciclo, tiveram seus finais não detectados. Para esses intervalos, quando o tempo máximo permitido para detecção dos respectivos fins foi atingido, zeros foram atribuídos ao detector, limitando os respectivos intervalos. Isso pode ser visto na Figura 4.12 (d).

Além disso, os módulos das diferenças e os ângulos formados entre estas podem ser vistos na Figura 4.12 (b) e (c), respectivamente.

Também, o sinal obtido pela metodologia de compensação (Seção 3.4.1, utilizando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação) é mostrado na Figura 4.12 (a) junto com o sinal distorcido.

O erro transitório percentual para essa análise aparece na Figura 4.12 (e). O valor absoluto máximo desse erro foi de 5,3622% e ocorre devido a antecipação errada do final do quarto intervalo de saturação detectado. Essa antecipação foi de uma amostra, correspondente ao maior pico visível na Figura 4.12 (e).

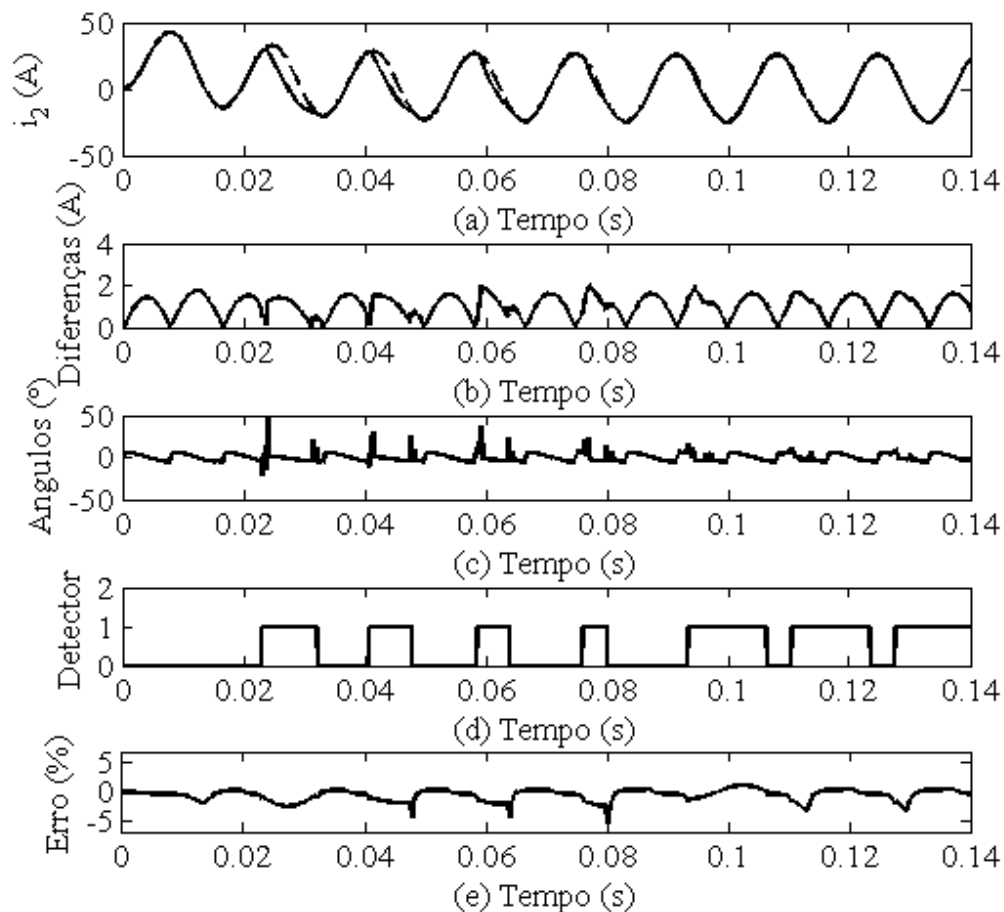


Figura 4.12 – Resultados para a combinação entre detecção através do ângulo formado entre as diferenças do sinal de corrente e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valor absoluto das diferenças. (c) Ângulo formado entre as diferenças. (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

Os valores RMS para os sinais de corrente ideal, corrigido e distorcido aparecem na Figura 4.13. Nessa Figura, pode-se notar a melhora obtida para o sinal de corrente, que é atribuída à reconstrução do sinal distorcido. Também é visível a excelente aproximação entre o sinal de corrente corrigido e o sinal ideal.

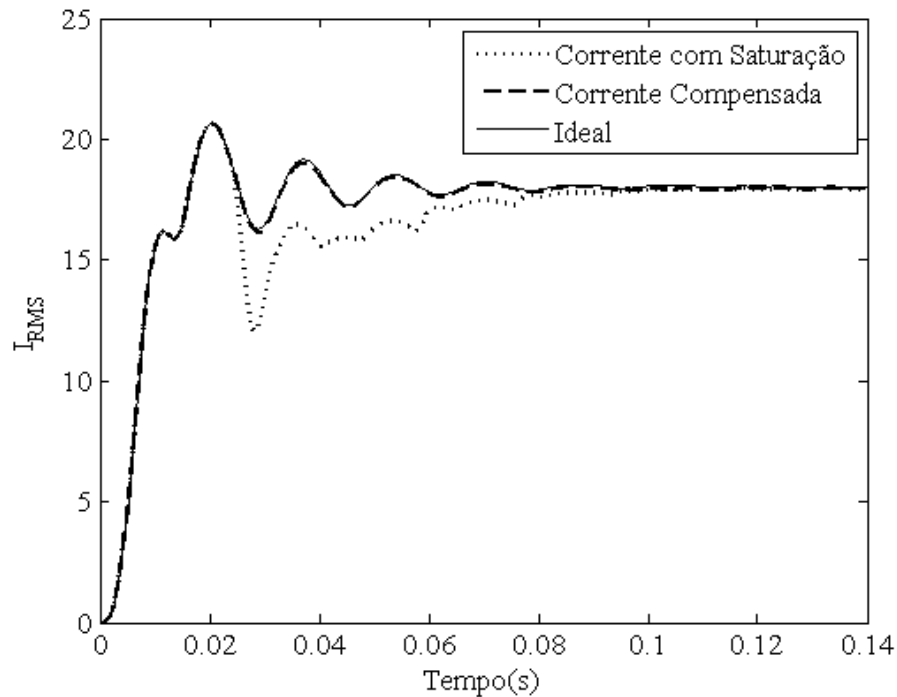


Figura 4.13 – Valores RMS para a combinação entre detecção através do ângulo formado entre as diferenças do sinal de corrente e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado.

#### 4.3.1.6 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação Através da Terceira Derivada e Correção por Mínimos Quadrados

Os resultados para essa combinação aparecem na Figura 4.14. As formas de onda corrigida e distorcida por saturação aparecem na Figura 4.14 (a).

A detecção por terceira derivada apresentou bom desempenho, encontrando intervalos de saturação a partir do segundo ciclo do sinal. Nenhum trecho saturado foi encontrado por essa técnica após 0,12 segundos. Isso pode ser visto na Figura 4.14 (b)

Entretanto, o elevado erro transitório da compensação, para o primeiro intervalo de saturação detectado, é justificado pela detecção atrasada do início em uma amostra e antecipação do fim por uma amostra. Esse erro ocorre porque amostras pertencentes ao trecho saturado foram incluídas erroneamente no cálculo dos parâmetros característicos do sinal.

Apesar desse erro elevado, a compensação do sinal não é comprometida, uma vez que o valor absoluto máximo do erro transitório foi de 9,6553%. Para os demais intervalos de saturação detectados, o valor absoluto do erro transitório não ultrapassou 6%. Esses valores podem ser vistos na Figura 4.14 (c).

A boa qualidade dessa compensação pode ser observada através da Figura 4.15, onde são mostrados os valores RMS para o sinal ideal, o sinal compensado e o sinal distorcido. A



melhora na qualidade do sinal fica evidenciada pela proximidade entre o sinal de corrente corrigido e o sinal ideal.

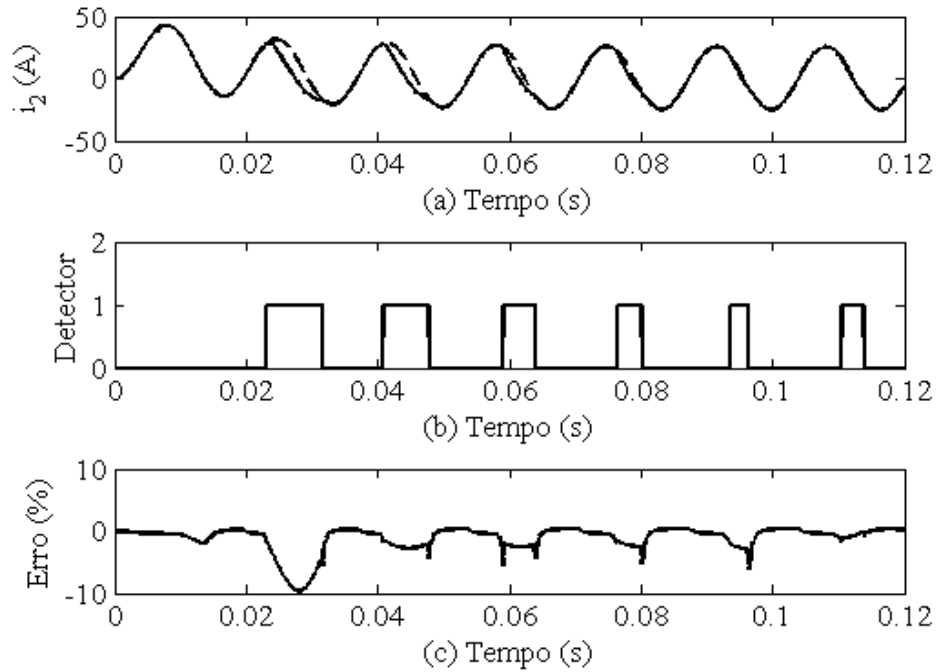


Figura 4.14 – Resultados para a combinação entre detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.

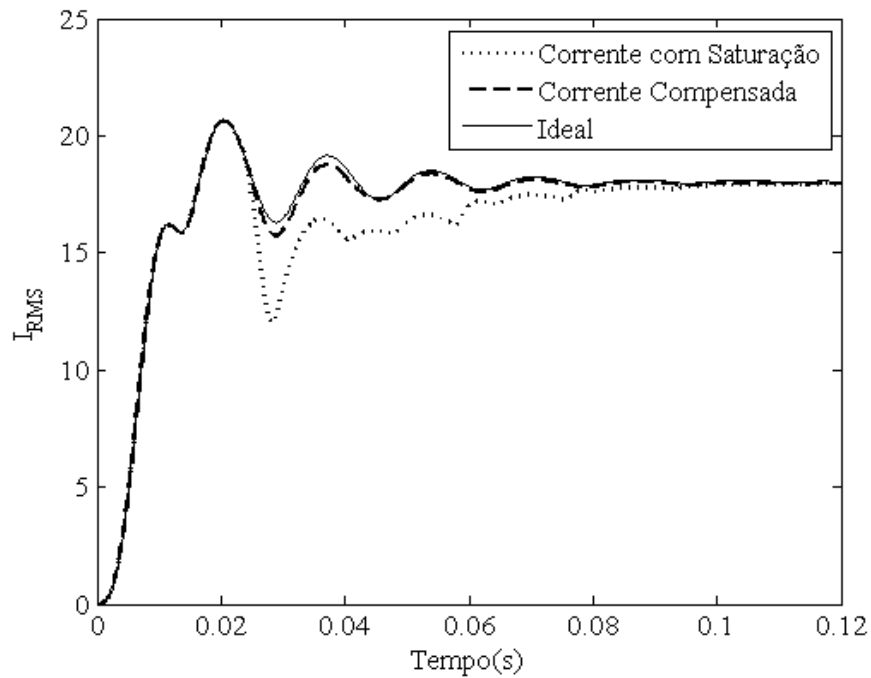


Figura 4.15 – Valores RMS para a combinação entre detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado.

#### 4.3.1.7 Resultados para a Detecção da Saturação Através da Distância Entre Pontos Consecutivos nos Planos Formados por Amostras de Corrente Secundária e suas Funções-Diferença e Correção por Mínimos Quadrados Utilizando Apenas Pontos Anteriores ao Respetivo Intervalo de Saturação

Os resultados para essa combinação aparecem na Figura 4.16. Nessa Figura, as formas de onda do sinal distorcido e do sinal compensado aparecem em (a). Os valores calculados para as distâncias entre pontos consecutivos nos planos del2 x del1 e del3 x del2 são mostrados nos gráficos (b) e (c) da mesma Figura.

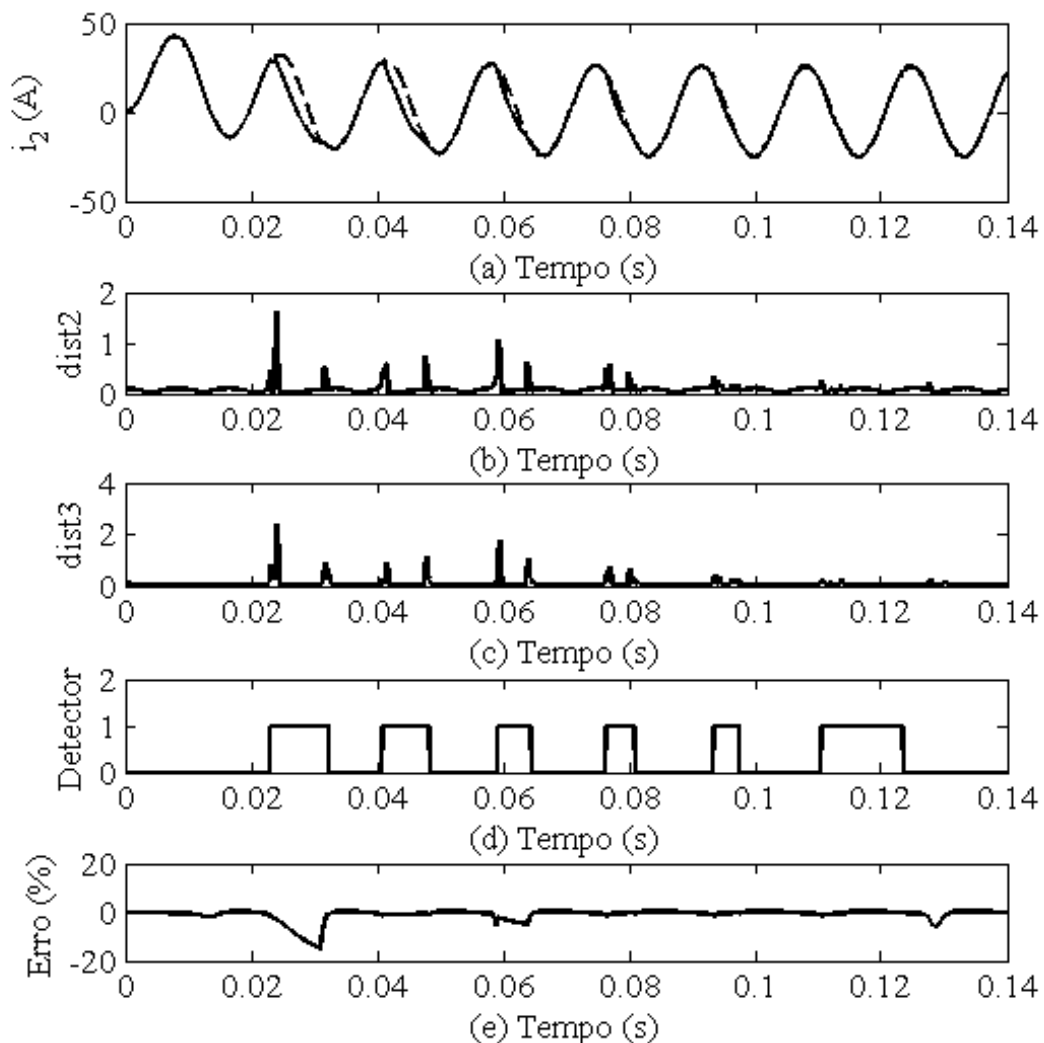


Figura 4.16 – Detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores a cada intervalo de saturação. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valores das distâncias no plano del2 x del1. (c) Valores das distâncias no plano del3 x del2. (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

Essa técnica de detecção apresentou bom desempenho, determinando adequadamente os intervalos de saturação cujas distorções causadas apresentavam maior severidade, sendo

estes ocorridos a partir do segundo até o quinto ciclo do sinal. Entretanto, o último intervalo de saturação detectado não teve seu final determinado e ao detector foi atribuído zero quando o tempo máximo permitido para detecção do fim foi atingido. Vale ainda ressaltar que, apesar de ser uma saturação de curta duração e proporcionar uma distorção desprezível, o intervalo de saturação presente no sexto ciclo do sinal foi corretamente detectado (penúltimo intervalo de saturação detectado). Isso pode ser visto na Figura 4.16 (d).

Por utilizar somente pontos anteriores a cada intervalo de saturação, essa metodologia de correção pode apresentar erros elevados quanto maior for à duração do respectivo intervalo. Isso ocorre porque, utilizando somente pontos anteriores a cada intervalo de saturação, o erro presente na estimação dos parâmetros característicos do sinal é maior, tornando o erro da compensação mais significativo a cada ponto. O erro transitório percentual para essa correção aparece na Figura 4.16 (e) e seu valor absoluto máximo foi de 15,1509%.

Mesmo com o erro elevado no final do primeiro intervalo de saturação, os valores RMS do sinal corrigido aproximam-se satisfatoriamente dos valores RMS do sinal ideal. Isso pode ser visto na Figura 4.17.

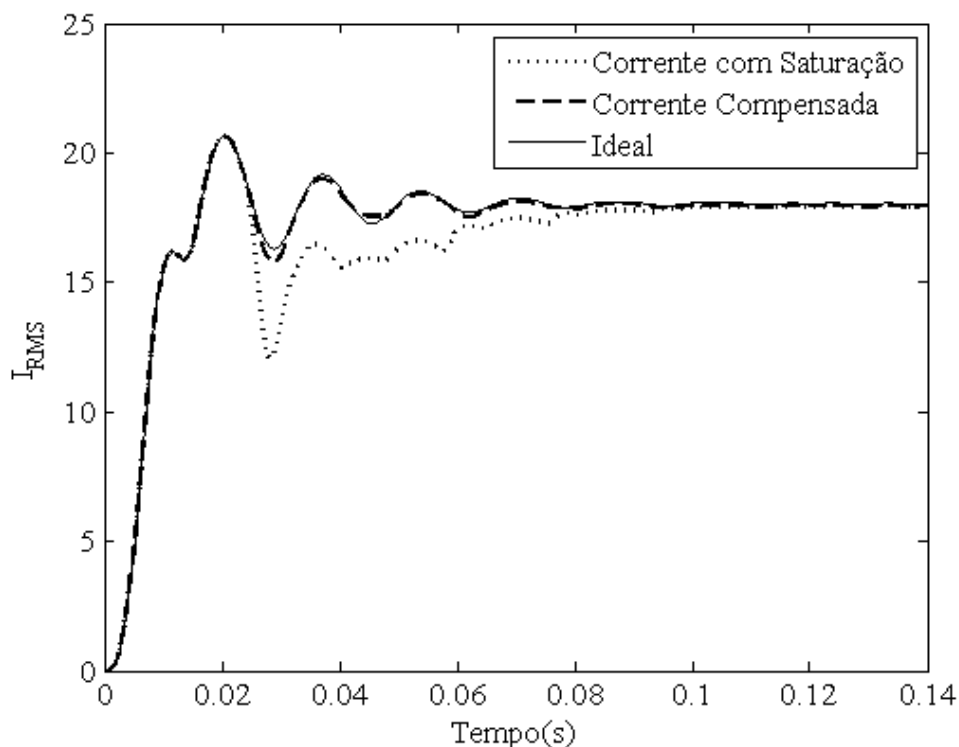


Figura 4.17 – Valores RMS para a combinação entre detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores a cada intervalo de saturação.

#### 4.3.1.8 Resultados para a Detecção da Saturação Através da Distância Entre Pontos Consecutivos nos Planos Formados por Amostras de Corrente Secundária e suas Funções-Diferença e Correção por Mínimos Quadrados

Os resultados para essa combinação aparecem na Figura 4.18, dispostos exatamente como na Figura 4.16. Por se tratar da mesma metodologia de detecção utilizada na análise anterior, os intervalos de saturação foram determinados exatamente como o ocorrido na Seção 4.3.1.7.

Como esperado, o erro transitório percentual da compensação foi menor utilizando pontos imediatamente anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação. O valor absoluto máximo desse erro foi de 5,9131% e ocorre durante um trecho de saturação não detectado. Essa porção do sinal corresponde ao trecho saturado de curta duração e distorção desprezível presente no oitavo ciclo do sinal (entre 0,12 e 0,14 segundos).

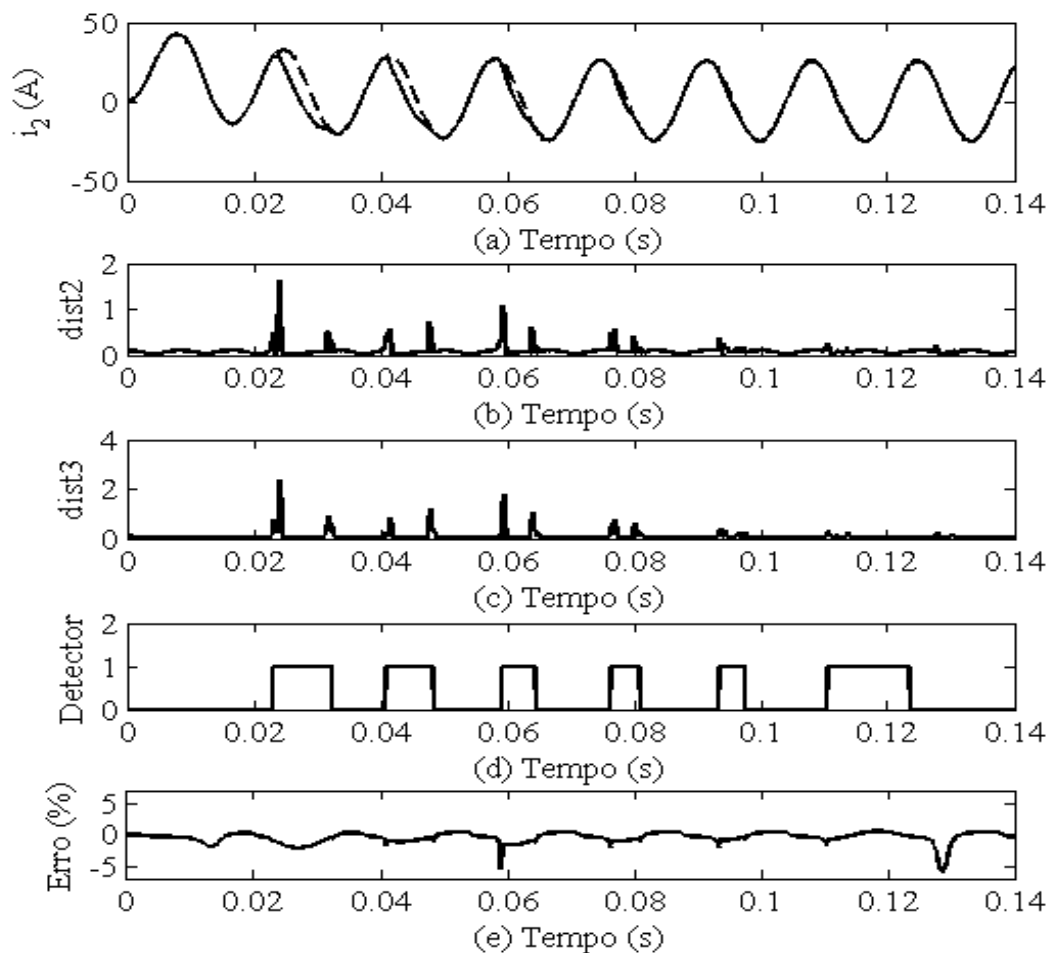


Figura 4.18 – Detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valores das distâncias no plano del2 x del1. (c) Valores das distâncias no plano del3 x del2. (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

A Figura 4.19 mostra os valores RMS obtidos para o sinal corrigido, bem como os valores RMS para o sinal ideal e o sinal distorcido por saturação. Nessa Figura, é possível verificar a excelente aproximação dos valores ideais, conseguida após a compensação do sinal distorcido.

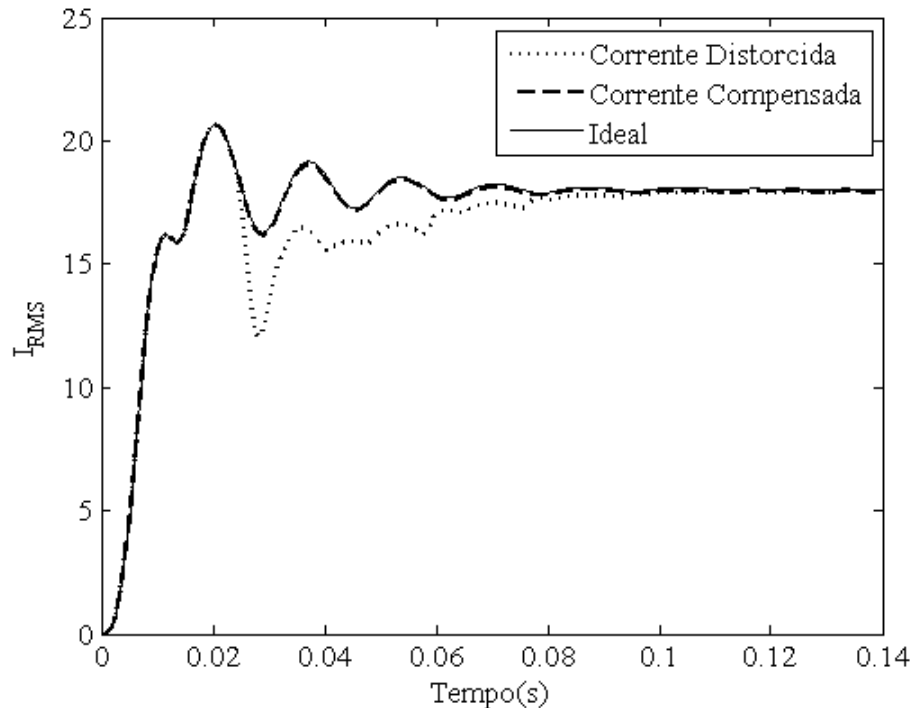


Figura 4.19 – Valores RMS para a combinação entre detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação.

#### 4.3.2 Falta Monofásica: Carga Resistiva de 4 $\Omega$ e 80% de Fluxo Remanescente

Conforme esperado, a presença de elevado fluxo remanescente provoca a saturação do TC mais rapidamente. Nesse caso, o primeiro intervalo de saturação acontece em menos de  $\frac{1}{4}$  de ciclo após o início da falta e os efeitos do fenômeno são consideráveis até o quinto ciclo após a ocorrência do curto-circuito.

##### 4.3.2.1 Resultados para a Correção dos Intervalos de Saturação por Mínimos Quadrados

Para a situação envolvendo carga resistiva de 4 ohms no secundário do TC e 80% de fluxo remanescente no núcleo, os resultados obtidos pela metodologia proposta por PAN *et al.* (2004), para correção a partir do segundo ciclo, aparecem nas Figuras 4.20 e 4.21. Nessa análise, o erro transitório percentual não ultrapassou 2% e seu valor absoluto máximo foi de 1,6210%.

Os valores RMS obtidos a partir do filtro de Fourier para o sinal corrigido aparecem na Figura 4.21, que mostra também os valores RMS para o sinal ideal e para o sinal distorcido por saturação. Nessa Figura, pode-se notar a grande melhora na qualidade do sinal a partir do momento em que os valores RMS do sinal corrigido passam a ser calculados pelo filtro.

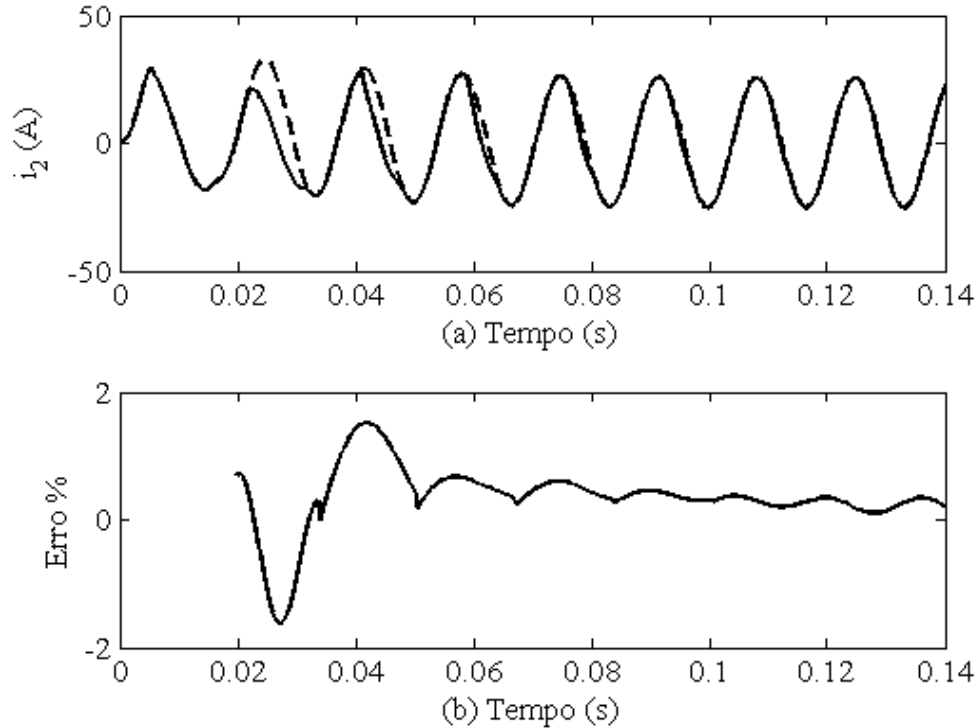


Figura 4.20 – Resultados para a correção a partir do segundo ciclo utilizando mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Erro transitório percentual.

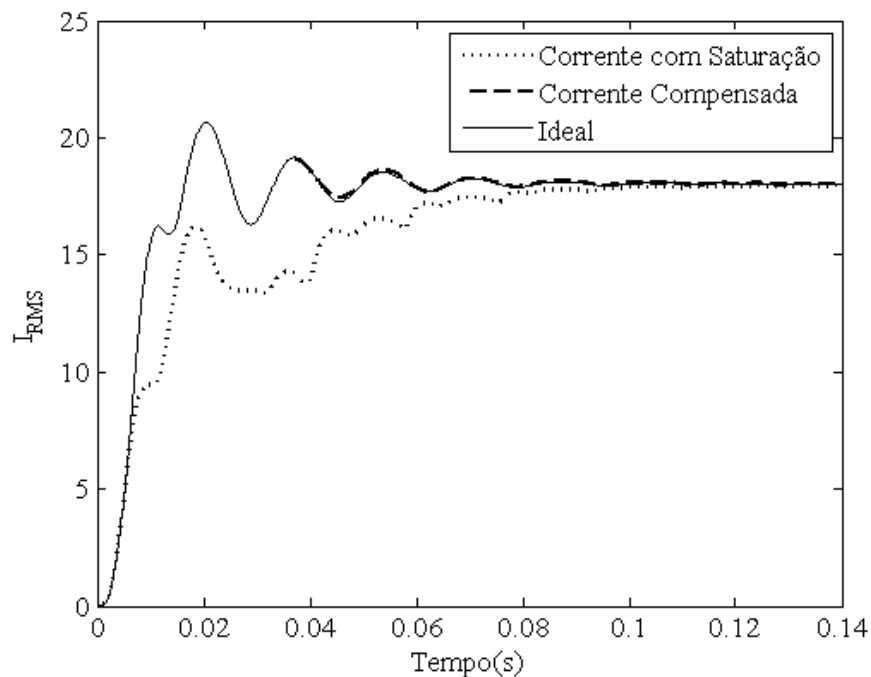


Figura 4.21 – Valores RMS para a correção a partir do segundo ciclo utilizando mínimos quadrados.

Os resultados obtidos pela aplicação dessa metodologia, fazendo a correção do sinal desde o primeiro ciclo, aparecem nas Figuras 4.22 e 4.23. Mesmo com a maior severidade das distorções presentes no primeiro e segundo ciclo do sinal, os valores absolutos de erro transitório percentual da compensação não ultrapassaram 6,0582%.

Os valores RMS dessa correção aparecem na Figura 4.23, onde é possível perceber a qualidade da aproximação entre os valores do sinal compensado e o sinal ideal de corrente secundária.

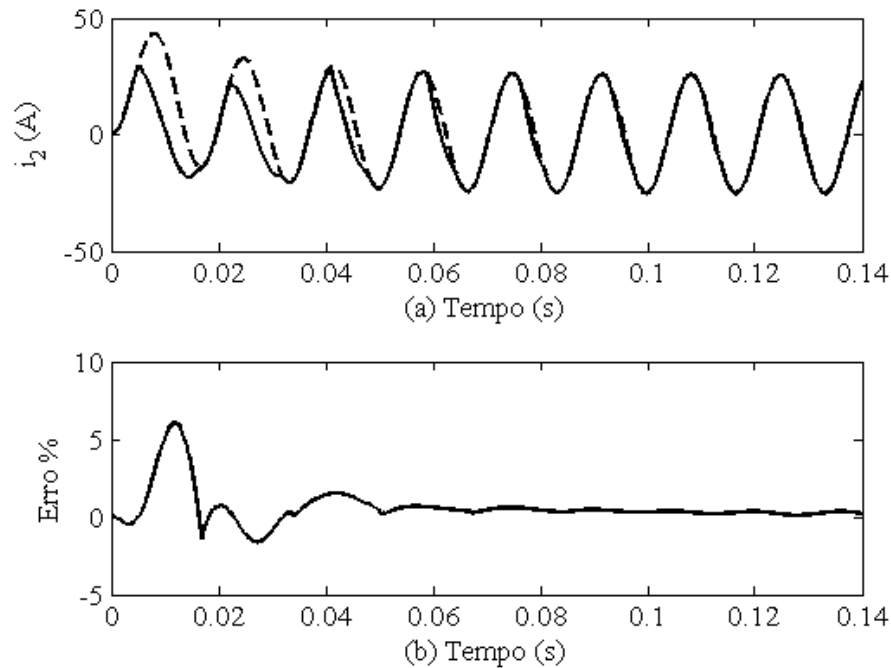


Figura 4.22 – Resultados para a correção a partir do primeiro ciclo utilizando mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Erro transitório percentual.

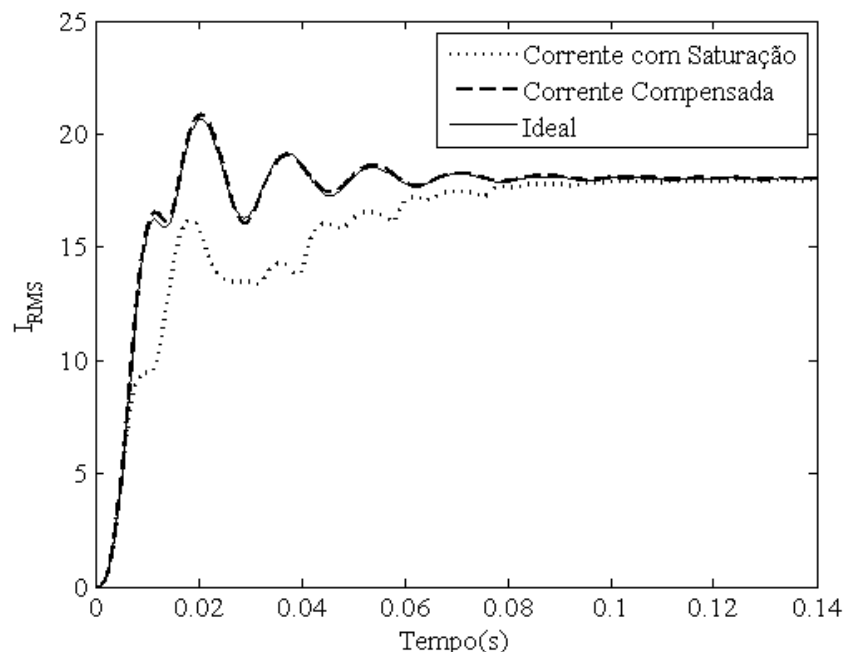


Figura 4.23 – Valores RMS para a correção a partir do primeiro ciclo utilizando mínimos quadrados.

#### 4.3.2.2 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação por Transformada Wavelet Discreta e Correção Utilizando Técnica de Regressão

Para esse caso, a técnica de detecção por *Transformada Wavelet Discreta* determinou corretamente os intervalos de saturação, detectando trechos distorcidos em oito ciclos do sinal após o início da falta. Mesmo os intervalos de saturação de curta duração foram detectados adequadamente. Os resultados para essa análise são mostrados na Figura 4.24.

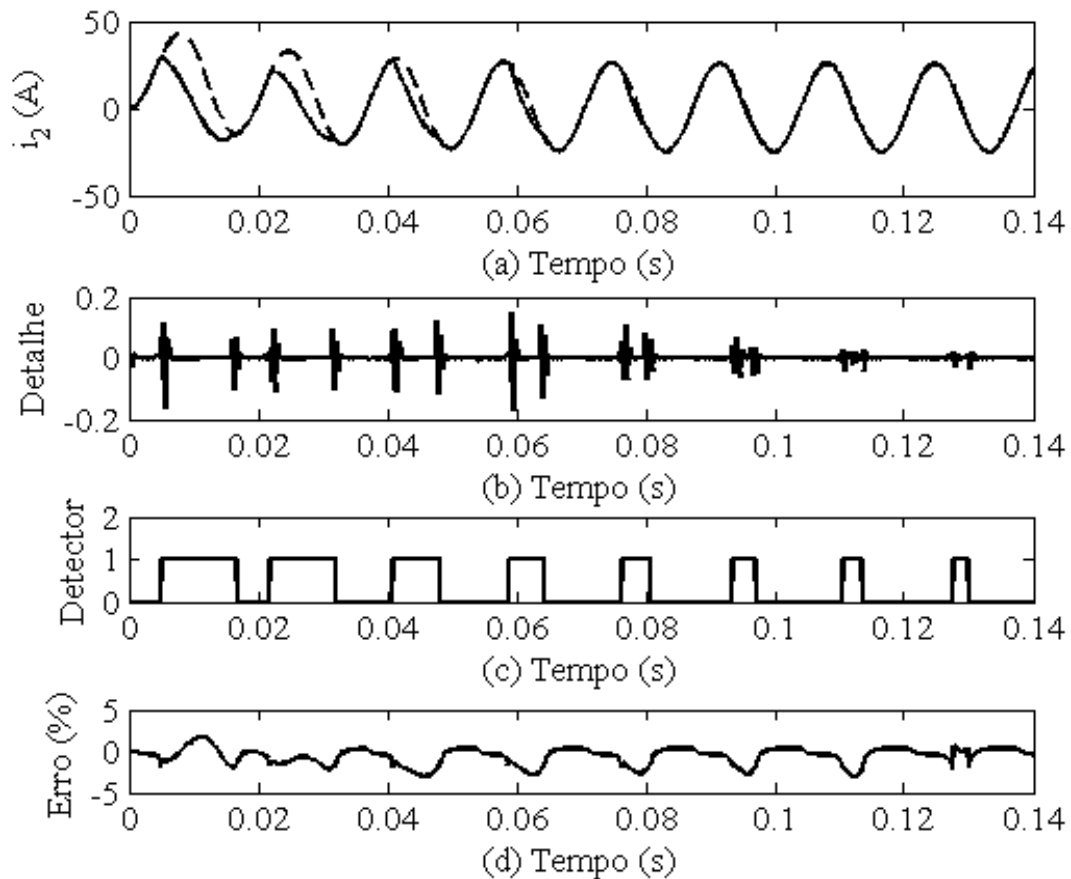


Figura 4.24 – Resultados para a combinação entre detecção por transformada wavelet e correção por técnica de regressão. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

O valor absoluto máximo do erro transitório percentual para a compensação desse sinal com a técnica de regressão foi de 3,1123%. Esse valor ocorre durante a correção do penúltimo intervalo de saturação detectado.

A Figura 4.25 mostra os valores RMS obtidos para o sinal compensado. Nessa Figura, é possível verificar que a correção teve uma excelente aproximação dos valores ideais, comprovando a qualidade do processo de reconstrução da forma de onda do sinal distorcido.



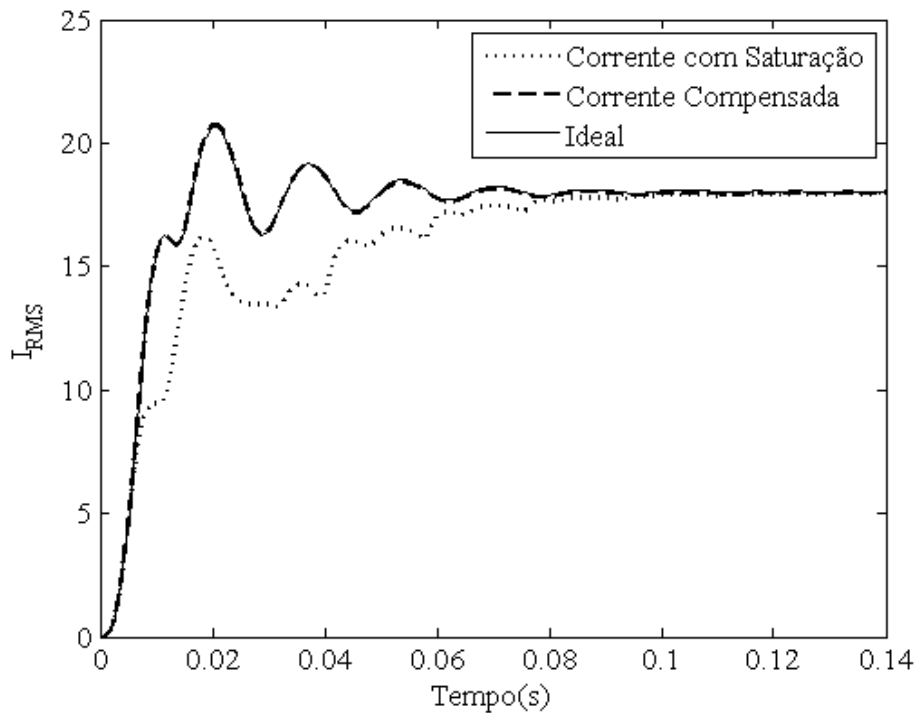


Figura 4.25 – Valores RMS para a combinação entre detecção por transformada wavelet e correção por regressão.

#### 4.3.2.3 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação a Partir das Funções-Diferença do Sinal Analisado e Correção por Corrente de Magnetização

Essa técnica de detecção determinou sete intervalos de saturação, que correspondem às distorções verificadas a partir do primeiro ciclo após o início da falta. Foi observado também que o último intervalo de saturação detectado não teve seu fim determinado. Entretanto, após o tempo máximo permitido para detecção do fim, foi atribuído zero ao detector, limitando assim o trecho a ser corrigido.

Os resultados para essa combinação são mostrados na Figura 4.26, onde é possível verificar as formas de onda corrigida e distorcida por saturação (gráfico a), os valores das respectivas funções-diferença (gráficos b, c e d) e a atuação do detector (gráfico e).

Além disso, os valores para o erro transitório percentual da compensação aparecem na Figura 4.26 (f). O valor absoluto máximo desse erro foi de 15,6041%. Esse valor pode ser atribuído a um erro na estimação do fluxo inicial para o primeiro intervalo de saturação.

Apesar do erro transitório elevado para a compensação dos dois primeiros ciclos do sinal, a correção não é comprometida. Isso pode ser visto pela boa aproximação entre os valores RMS dos sinais corrigido e ideal, conforme é mostrado na Figura 4.27.

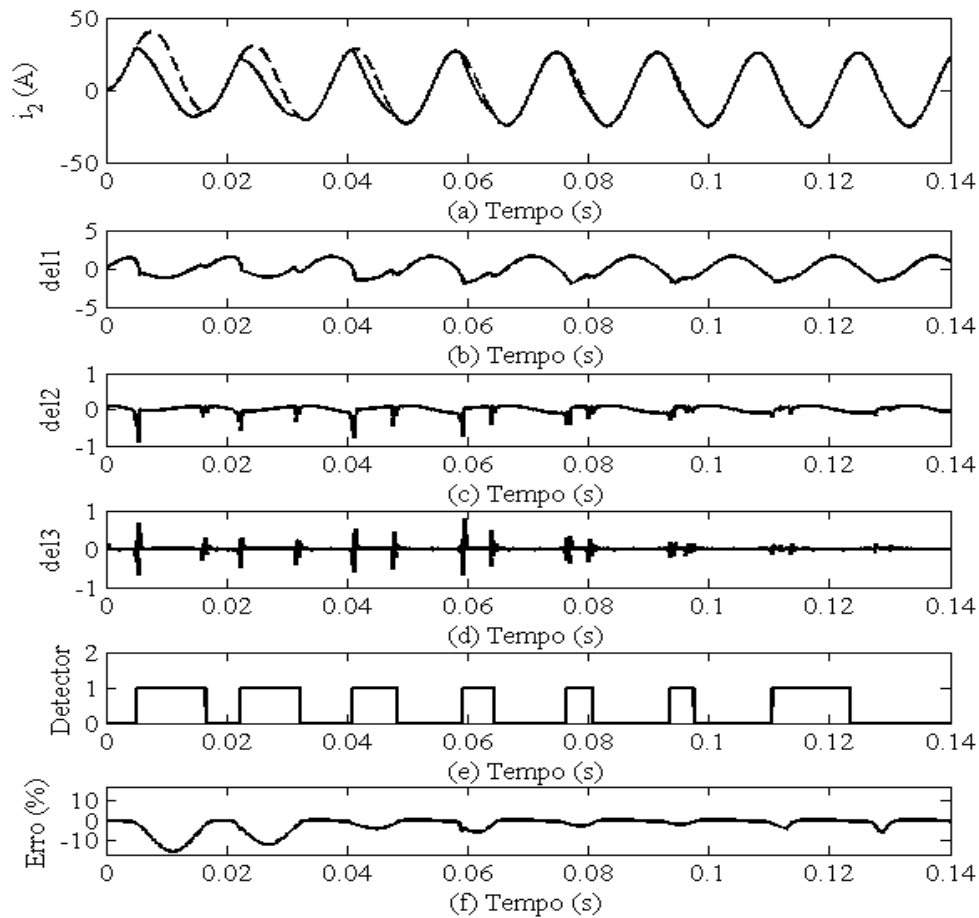


Figura 4.26 – Resultados para a combinação entre detecção através das funções-diferença e correção por corrente de magnetização. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Primeira função-diferença (del1). (c) Segunda função-diferença (del2). (d) Terceira função-diferença (del3). (e) Detector de saturação. (f) Erro transitório percentual.

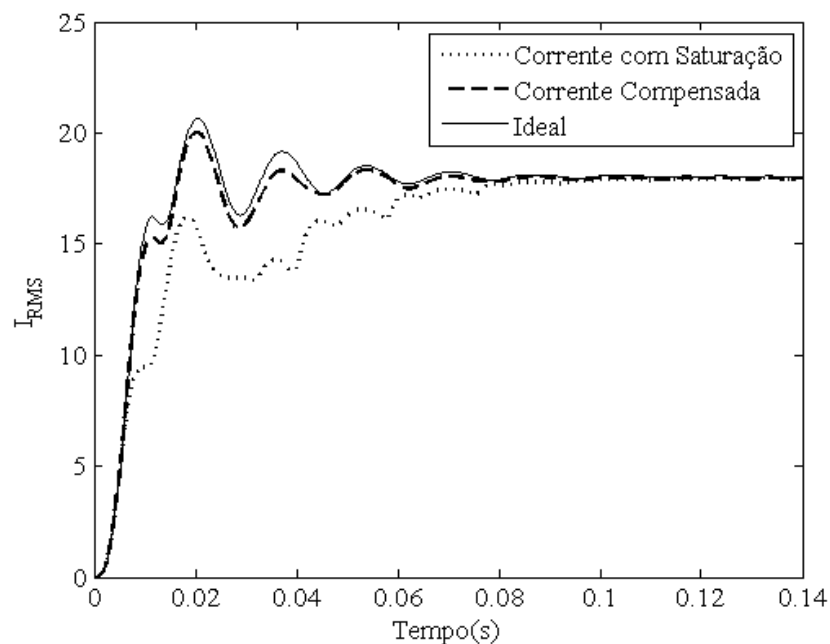


Figura 4.27 – Valores RMS para a combinação entre detecção através das funções-diferença e correção por corrente de magnetização.

#### 4.3.2.4 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação por Morfologia Matemática e Correção por Mínimos Quadrados

O detector de saturação, que utiliza operadores da Morfologia Matemática, atuou corretamente, determinando todos os intervalos de saturação presentes no sinal. Até mesmo os trechos de saturação de menor relevância e curta duração foram detectados precisamente. Entretanto, verificou-se que o segundo intervalo foi detectado uma amostra após o início do mesmo, contribuindo para o maior erro transitório durante esse trecho. Os resultados para essa análise aparecem na Figura 4.28.

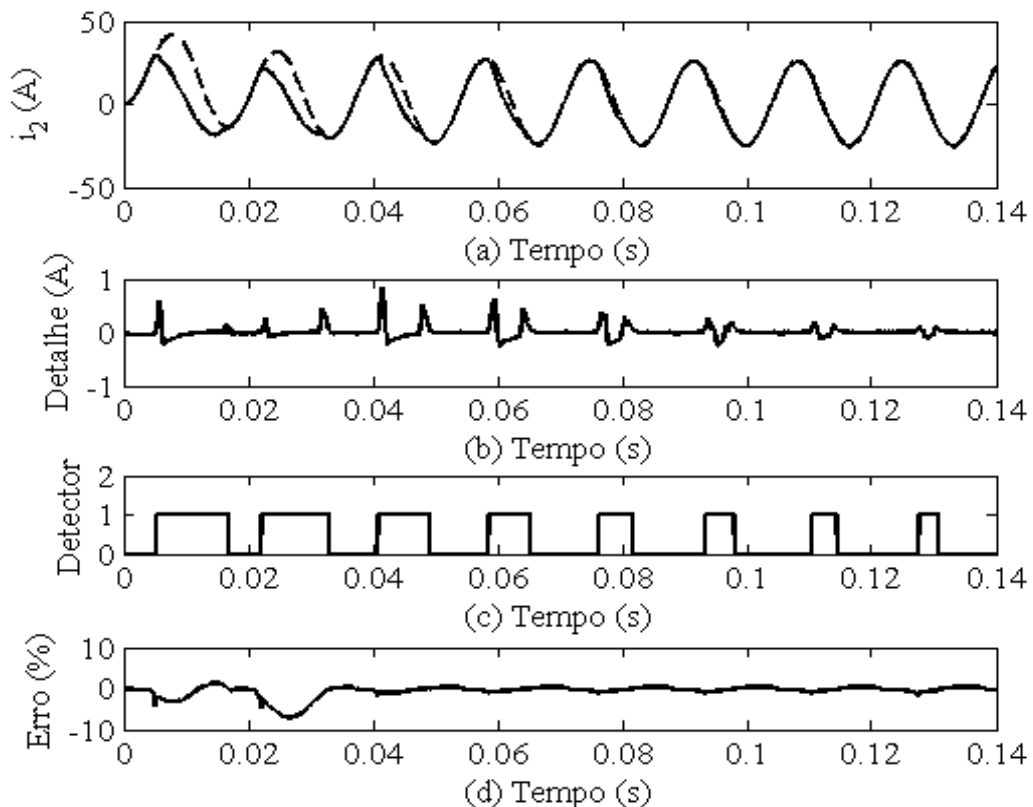


Figura 4.28 – Resultados para a combinação entre detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Detalhe do sinal obtido pela morfologia matemática. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

O valor absoluto máximo do erro transitório mostrado na Figura 4.28 (d) foi de 7,0608% e ocorre durante o segundo ciclo do sinal. Esse erro ocorre devido à utilização de um ponto pertencente ao trecho distorcido do sinal no cálculo dos parâmetros característicos, que ocorre em consequência do atraso na detecção desse intervalo. Para os demais intervalos de saturação, o erro da compensação não excedeu 3,3%.

Além disso, a qualidade da compensação do sinal distorcido pode ser verificada pela proximidade entre os valores RMS dos sinais corrigido e ideal, que são mostrados na Figura

4.29. Nessa Figura, também é possível observar que a maior diferença entre o sinal ideal e o sinal corrigido ocorre entre os instantes 0,02 e 0,04 segundos, justamente onde o erro transitório da compensação é maior.

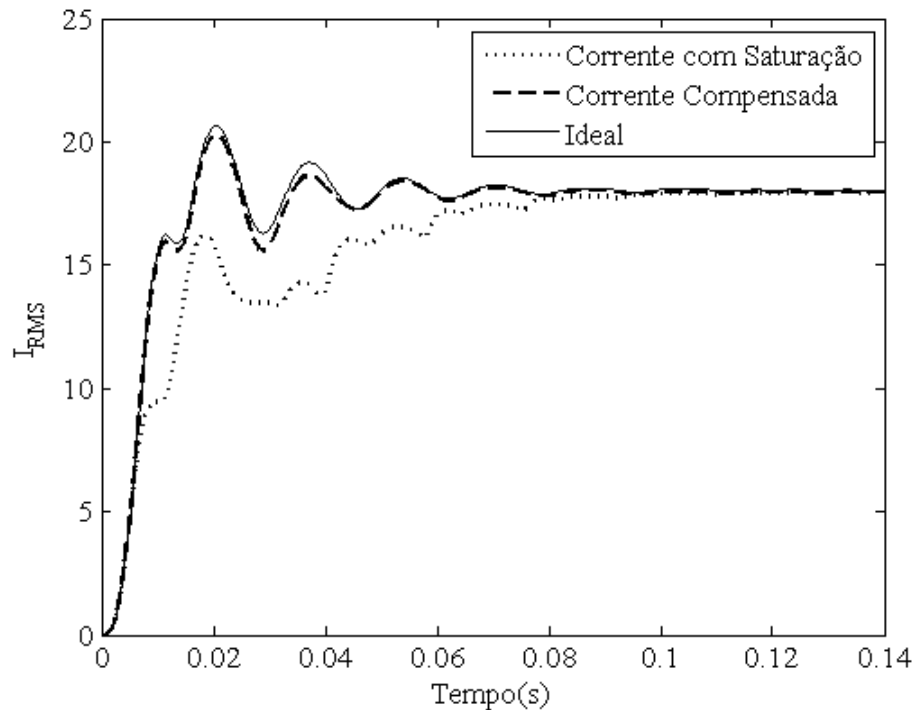


Figura 4.29 – Valores RMS para a combinação entre detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado.

#### 4.3.2.5 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação Através do Ângulo Formado entre as Diferenças do Sinal de Corrente e Correção por Mínimos Quadrados

A metodologia de detecção aplicada durante essa análise obteve bons resultados. Os intervalos de saturação de maior importância foram adequadamente determinados (trechos distorcidos verificados nos cinco primeiros ciclos do sinal de corrente). Contudo, os três últimos trechos distorcidos detectados pelo método tiveram seus finais não reconhecidos, sendo limitados quando o tempo máximo para detecção do fim foi atingido. Os resultados para essa combinação podem ser vistos na Figura 4.30.

O valor máximo do erro transitório percentual para essa correção foi de 5,4086%, ocorrido durante a compensação do segundo ciclo.

Os valores RMS para essa análise aparecem na Figura 4.31. Essa Figura mostra a proximidade entre os valores ideais e os valores corrigidos, comprovando a eficiência da metodologia.

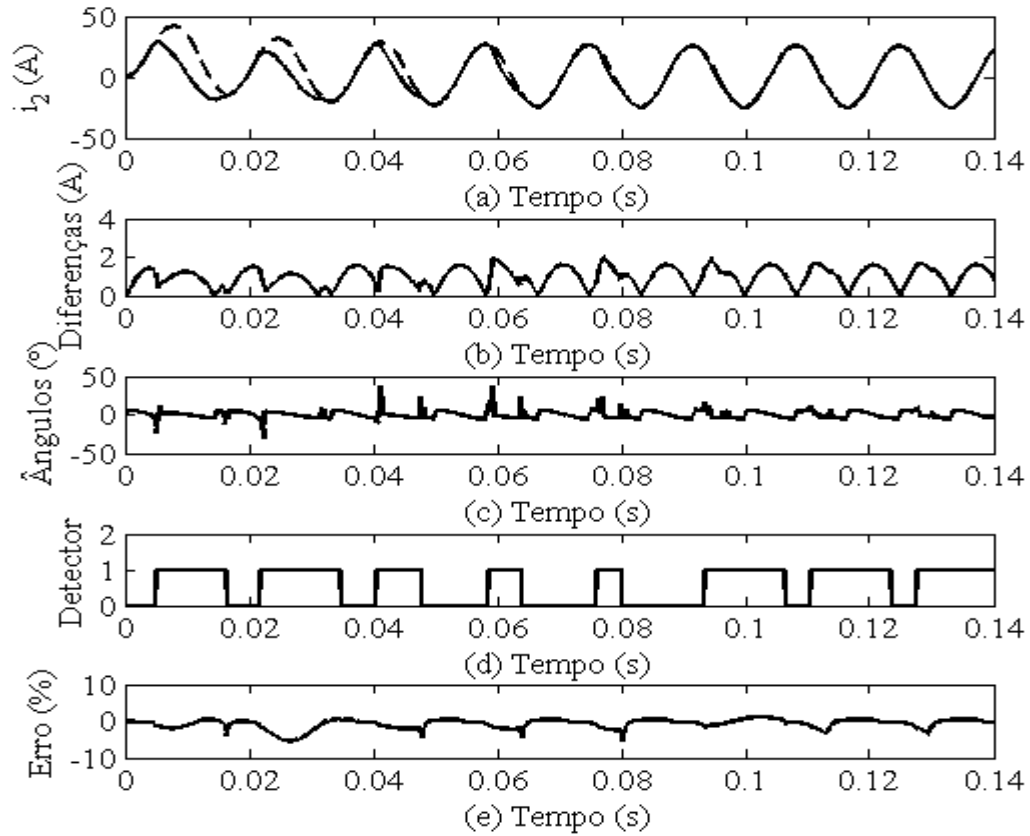


Figura 4.30 – Resultados para a combinação entre detecção através do ângulo formado entre as diferenças do sinal de corrente e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valor absoluto das diferenças. (c) Ângulo formado entre as diferenças. (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

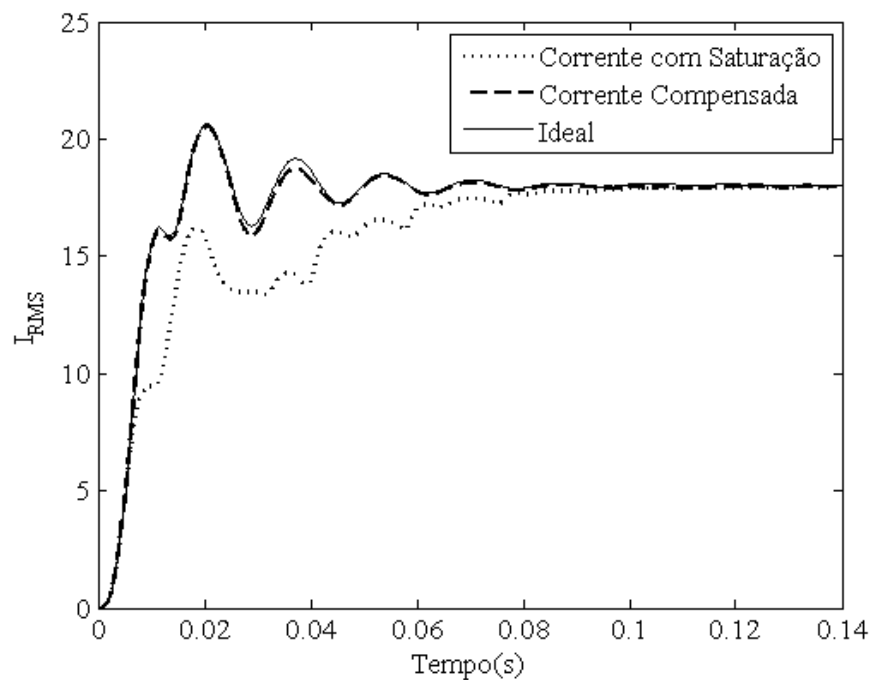


Figura 4.31 – Valores RMS para a combinação entre detecção através do ângulo formado entre as diferenças do sinal de corrente e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado.

#### 4.3.2.6 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação Através da Terceira Derivada e Correção por Mínimos Quadrados

Para esse caso, a técnica de detecção fundamentada na terceira derivada atuou adequadamente, encontrando os intervalos de saturação existentes nos sete primeiros ciclos do sinal. Entretanto, foi verificado que a detecção do segundo trecho saturado ocorreu um ponto após seu verdadeiro início. Esse mesmo trecho teve seu final antecipado em uma amostra. Isso justifica o maior erro transitório durante a compensação desse intervalo, já que valores do respectivo trecho distorcido são envolvidos na estimação dos parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda$  e  $B$ . O valor absoluto máximo do erro transitório percentual para essa correção foi de 9,8199%. Os resultados obtidos através dessa metodologia são mostrados na Figura 4.32.

Na Figura 4.32 (c), é possível verificar a existência de alguns incrementos repentinos nos valores do erro transitório, correspondentes a pontos do trecho saturado, que foram erroneamente interpretados pela metodologia de detecção como pertencentes à porção saudável do sinal.

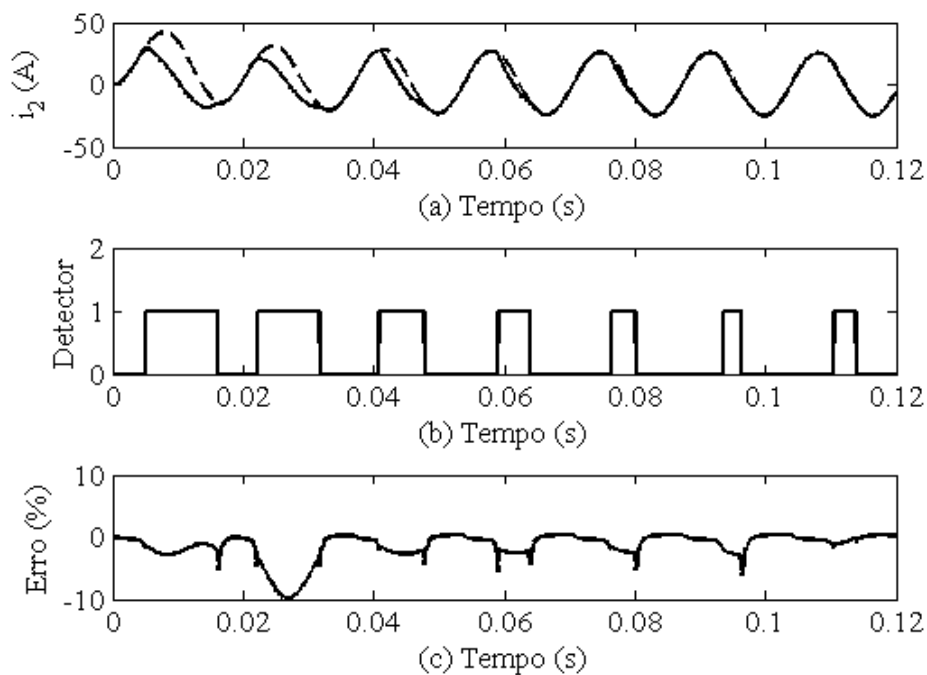


Figura 4.32 – Resultados para a combinação entre detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.

Apesar do elevado erro transitório durante a compensação do segundo intervalo de saturação, o desempenho da técnica de correção pode ser considerado bom, tendo em vista a boa aproximação entre os valores RMS do sinal ideal e do sinal corrigido, mostrada na Figura 4.33.

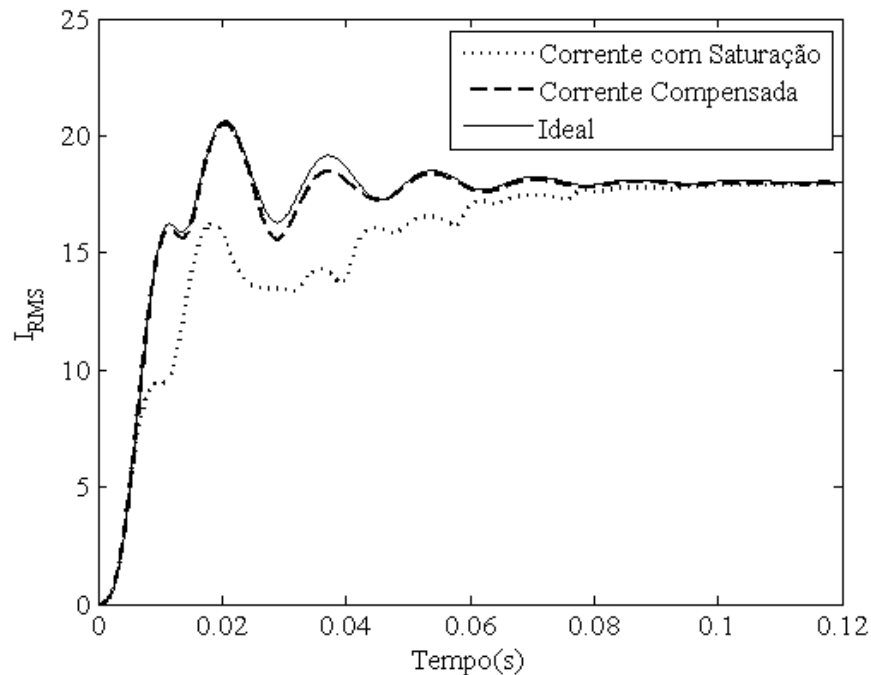


Figura 4.33 – Valores RMS para a combinação entre detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado.

#### 4.3.2.7 Resultados para a Detecção da Saturação Através da Distância Entre Pontos Consecutivos nos Planos Formados por Amostras de Corrente Secundária e suas Funções-Diferença e Correção por Mínimos Quadrados Utilizando Apenas Pontos Anteriores ao Respectivo Intervalo de Saturação

Neste caso, os intervalos de saturação foram adequadamente detectados pela metodologia utilizada. Foram detectados trechos distorcidos presentes nos sete primeiros ciclos do sinal. Porém, o último intervalo detectado não teve seu final determinado e ao detector foi atribuído zero, quando o tempo máximo permitido para detecção deste ponto foi atingido.

Os resultados para essa combinação aparecem na Figura 4.34. O erro transitório percentual dessa compensação aparece no gráfico (e) dessa Figura e seu valor absoluto máximo foi de 43,0486%. Esse valor elevado é consequência do erro da compensação, que aumenta drasticamente antes do fim do respectivo intervalo de saturação. Os valores estimados para correção tornam-se menores do que os valores amostrados, sendo descartados pela lógica utilizada, que mantém os valores do sinal original quando essa situação é verificada. O mesmo ocorre durante a compensação do segundo intervalo de saturação.

Apesar dos elevados erros ocorridos durante a compensação dos dois primeiros intervalos de saturação, essa correção pode ser considerada boa, uma vez que propiciou uma boa aproximação em relação aos valores RMS ideais. Isso pode ser visto na Figura 4.35.

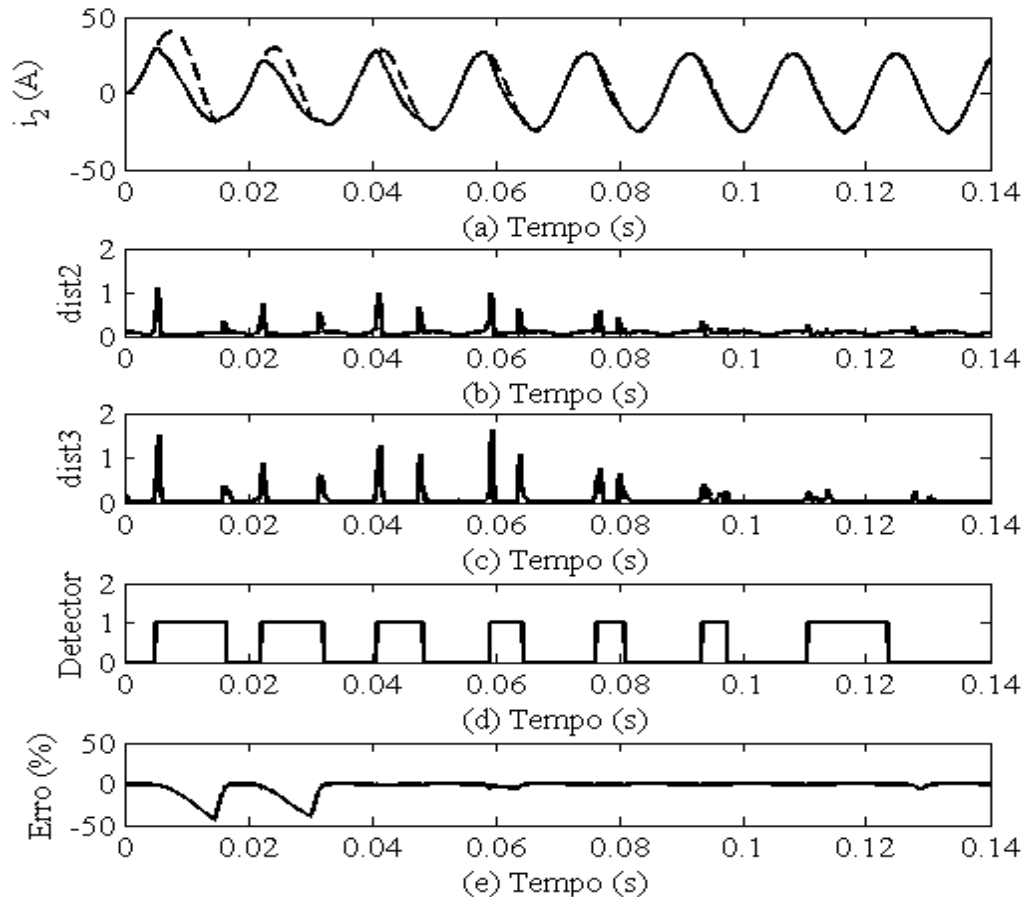


Figura 4.34 – Detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores a cada intervalo de saturação. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valores das distâncias no plano del2 x del1. (c) Valores das distâncias no plano del3 x del2. (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

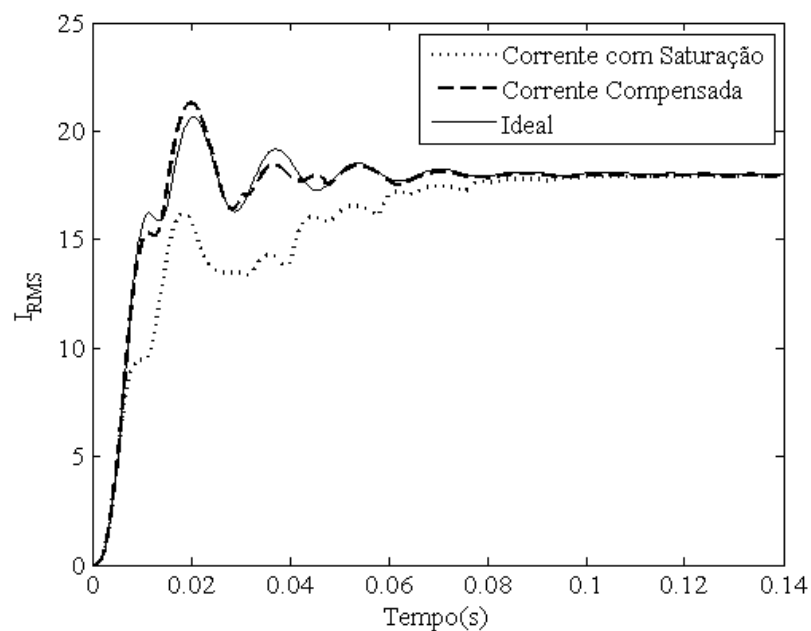


Figura 4.35 – Valores RMS para a combinação entre detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores a cada intervalo de saturação.



#### 4.3.2.8 Resultados para a Detecção da Saturação Através da Distância Entre Pontos Consecutivos nos Planos Formados por Amostras de Corrente Secundária e suas Funções-Diferença e Correção por Mínimos Quadrados

Os resultados da metodologia de detecção para esse caso são os mesmos mostrados na Seção 4.3.2.7. Entretanto, devido à utilização de pontos imediatamente anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação, o erro transitório da compensação foi menor do que aquele obtido utilizando somente pontos anteriores aos respectivos intervalos de saturação. A Figura 4.36 mostra os resultados obtidos para essa combinação.

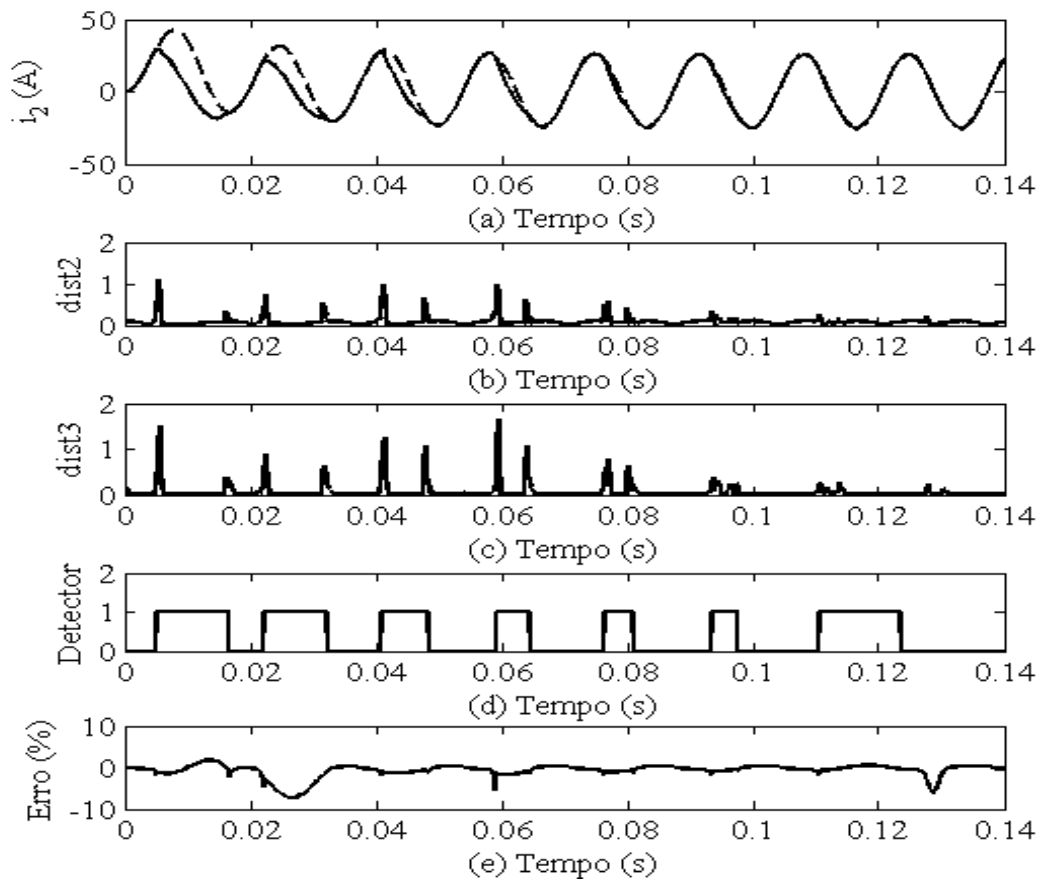


Figura 4.36 – Detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valores das distâncias no plano  $del2 \times del1$ . (c) Valores das distâncias no plano  $del3 \times del2$ . (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

O valor absoluto máximo do erro transitório percentual para essa correção foi de 7,3251%. Isso ocorreu durante a compensação do segundo intervalo de saturação, que teve a detecção de seu início atrasada em uma amostra. Devido à presença de uma amostra do trecho saturado durante o cálculo dos parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda$  e  $B$ , o erro da correção nesse trecho foi maior.

A Figura 3.37 mostra a boa aproximação entre o sinal corrigido e o sinal ideal de corrente, conseguido após a compensação dos intervalos de saturação. Isso comprova o bom desempenho da metodologia, independentemente do erro ocorrido durante a correção do segundo trecho distorcido da forma de onda do sinal.

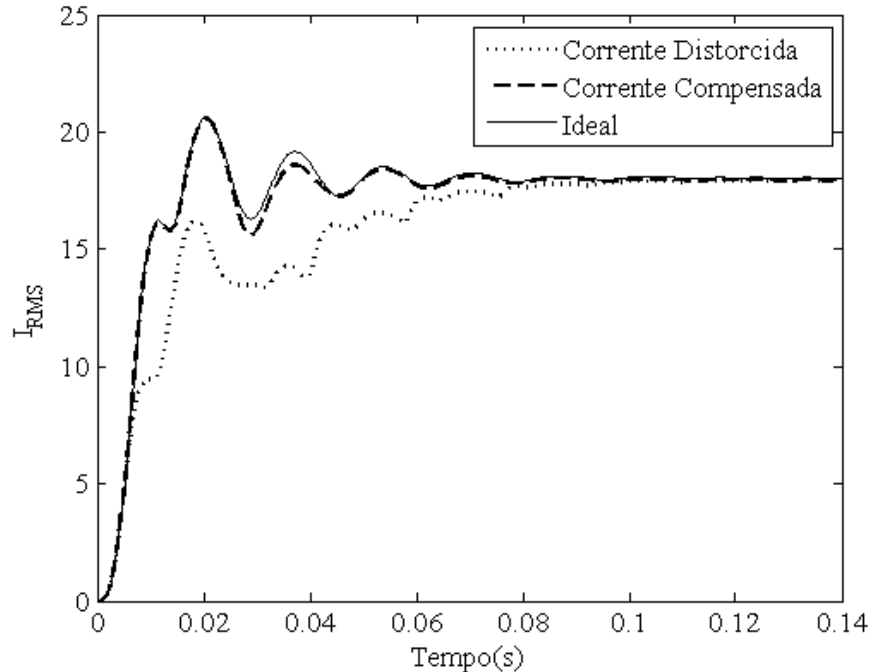


Figura 4.37 – Valores RMS para a combinação entre detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação.

### 4.3.3 Falta Monofásica: Carga de 4 $\Omega$ , 0 e 80% de Fluxo Remanescente, Fator de Potência Indutivo da Carga do TC

Uma carga de 4 ohms com fator de potência indutivo igual a 0,5 foi conectada ao secundário do TC. Dessa forma, a indutância presente na carga propiciou uma distorção de variações suaves ao sinal quando ocorre a saturação do transformador de corrente. Para o caso com 0% de fluxo remanescente, nenhum trecho distorcido foi detectado, mostrando que, para essa situação, o TC está bem dimensionado. Para a situação envolvendo fluxo remanescente de 80%, os resultados obtidos para cada análise são mostrados e discutidos nas seções seguintes.

#### 4.3.3.1 Resultados para a Correção dos Intervalos de Saturação por Mínimos Quadrados

Tanto a aplicação dessa metodologia para correção a partir do segundo ciclo, quanto a aplicação para correção a partir do primeiro ciclo, tiveram desempenhos abaixo do esperado, quando comparados com aqueles obtidos para os casos anteriores.

A correção a partir do segundo ciclo obteve desempenho razoável, uma vez que o valor absoluto máximo do erro transitório para essa compensação foi de 8,2140%. Os resultados dessa correção são mostrados na Figura 4.38.

Embora o erro tenha sido relativamente alto, os valores RMS do sinal corrigido aproximam-se bastante dos valores ideais, conforme é mostrado na Figura 3.39. Nessa Figura, também é possível notar a grande melhora atribuída ao sinal graças à correção do mesmo.

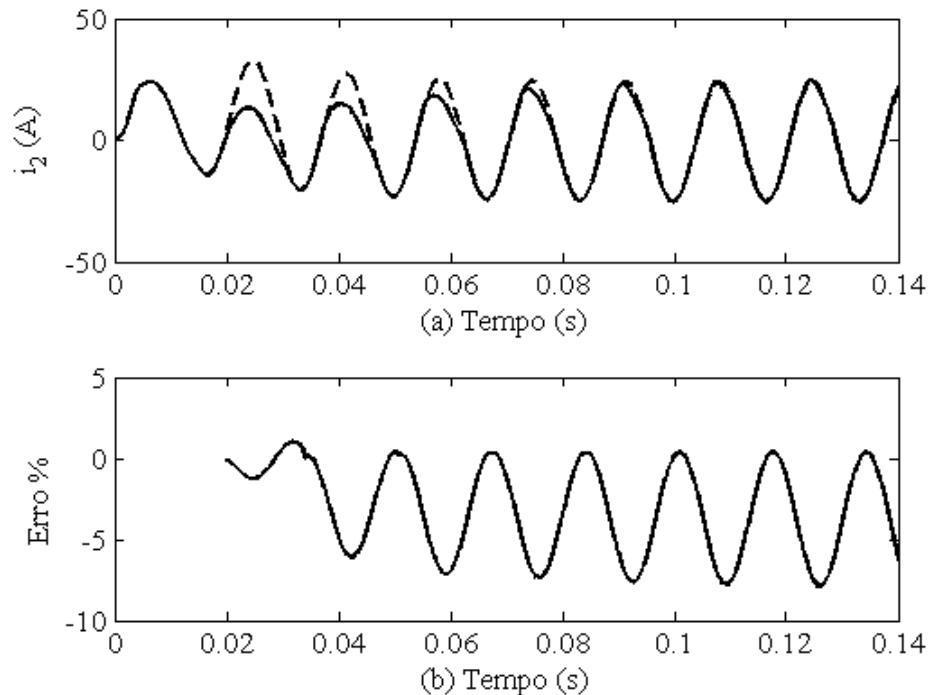


Figura 4.38 – Resultados para a correção a partir do segundo ciclo utilizando mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Erro transitório percentual.

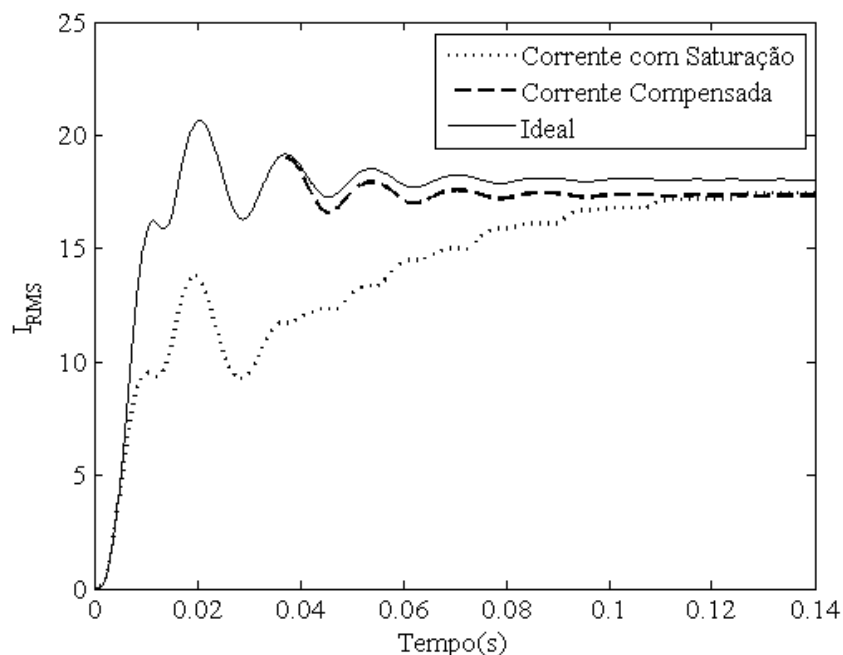


Figura 4.39 – Valores RMS para a correção a partir do segundo ciclo utilizando mínimos quadrados.

Para a correção a partir do primeiro ciclo, os resultados aparecem na Figura 4.40. O erro transitório percentual atingiu 21,64% durante a correção do primeiro trecho distorcido. Isso ocorre pela não utilização de pontos posteriores ao respectivo trecho, o que promove um maior erro durante a estimação dos parâmetros característicos do sinal.

Entretanto, apesar do erro transitório elevado da correção, houve uma boa aproximação entre os valores RMS do sinal corrigido e do sinal ideal, promovendo uma melhora considerável na qualidade do sinal. Isso pode ser visto na Figura 4.41.

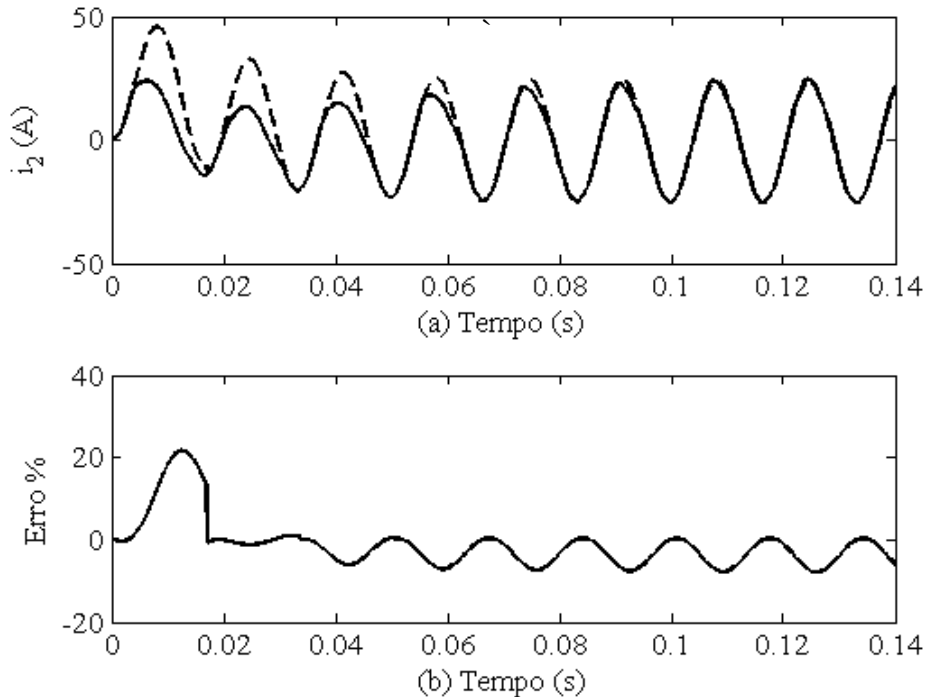


Figura 4.40 – Resultados para a correção a partir do primeiro ciclo utilizando mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Erro transitório percentual.

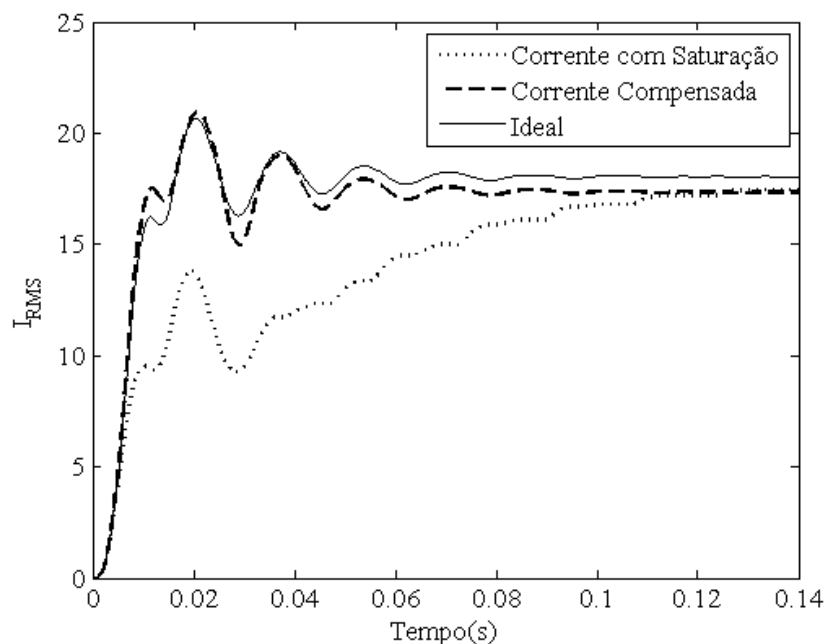


Figura 4.41 – Valores RMS para a correção a partir do primeiro ciclo utilizando mínimos quadrados.

#### 4.3.3.2 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação por Transformada Wavelet Discreta e Correção Utilizando Técnica de Regressão

Essa combinação obteve os melhores resultados para a compensação do sinal. Estes podem ser vistos na Figura 4.42.

A metodologia de detecção atuou de forma satisfatória, determinando oito intervalos de saturação que deterioravam a qualidade do respectivo sinal de corrente. Além disso, o erro transitório percentual não ultrapassou o valor absoluto de 3,3944%.

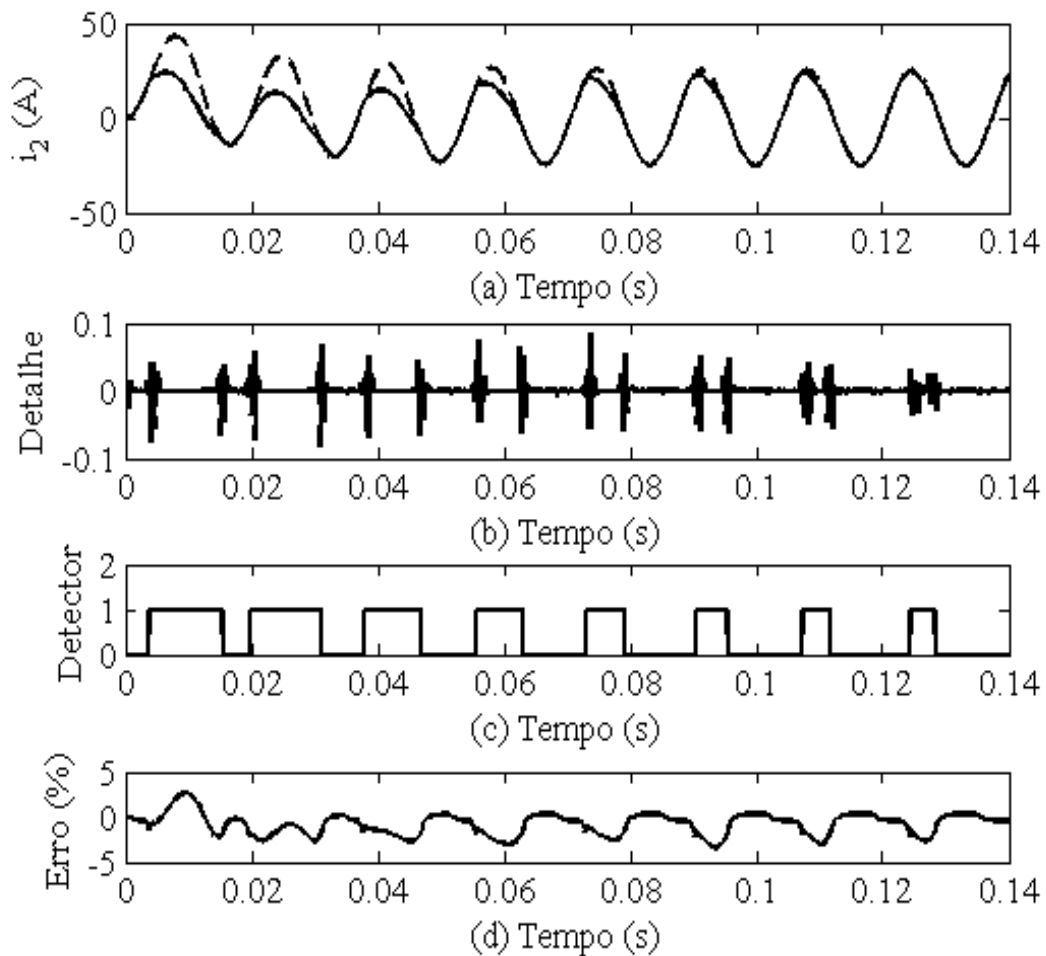


Figura 4.42 – Resultados para a combinação entre detecção por transformada wavelet e correção por técnica de regressão. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

A Figura 4.43 mostra os valores RMS para essa compensação. Nessa Figura, pode-se notar a excelente aproximação obtida pela correção em relação aos valores ideais de corrente secundária, o que comprova o bom desempenho da técnica de utilizada.

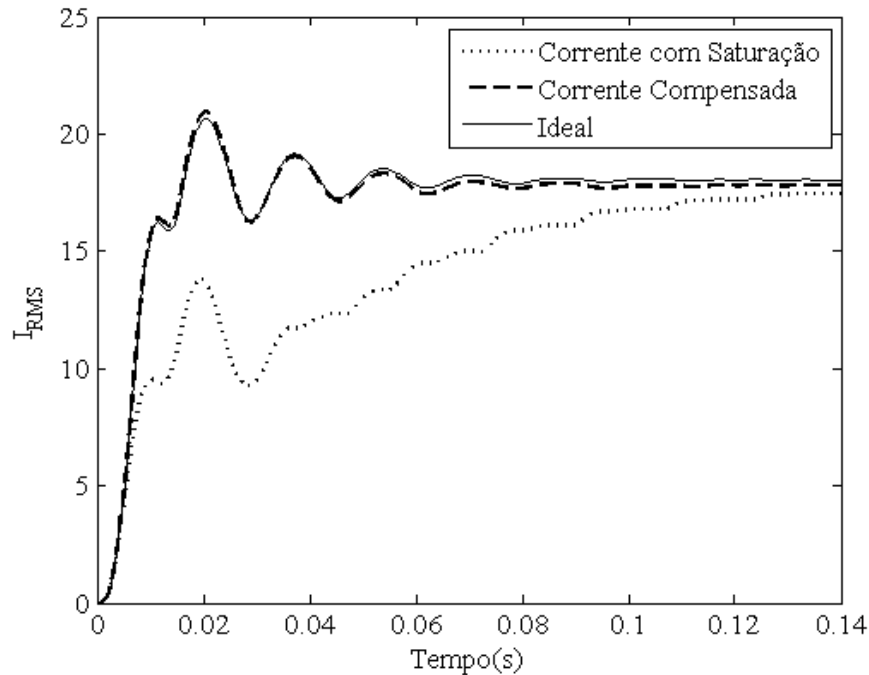


Figura 4.43 – Valores RMS para a combinação entre detecção por transformada wavelet e correção por regressão.

#### 4.3.3.3 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação a Partir das Funções-Diferença do Sinal Analisado e Correção por Corrente de Magnetização

Os resultados para essa análise aparecem na Figura 4.44. A metodologia de detecção atuou adequadamente, determinando todos os oito intervalos de saturação, conforme mostrado na Figura 4.44 (e).

As formas de onda para o sinal corrigido e o sinal distorcido são mostradas na Figura 4.44 (a). Apesar da detecção precisa dos intervalos de saturação, o erro transitório percentual da compensação por corrente de magnetização foi relativamente alto durante os três primeiros trechos corrigidos. Esse erro elevado ocorre em consequência da carga do TC ser considerada puramente resistiva pela metodologia de correção, o que acrescenta erros aos cálculos dos valores de corrente de excitação a serem somados aos respectivos valores do sinal amostrado. Também justifica o erro elevado nos três primeiros trechos, o fato de a distorção nestes intervalos ser mais severa. O erro transitório para essa compensação pode ser visto na Figura 4.44 (f), e seu valor absoluto máximo não excedeu 12,7834%.

Além disso, os valores RMS para o sinal corrigido são mostrados na Figura 4.45. Nota-se que, apesar da qualidade da aproximação em relação aos valores ideais ser relativamente baixa, a compensação proporcionou grande melhora à característica do sinal quando comparada com o sinal distorcido original.

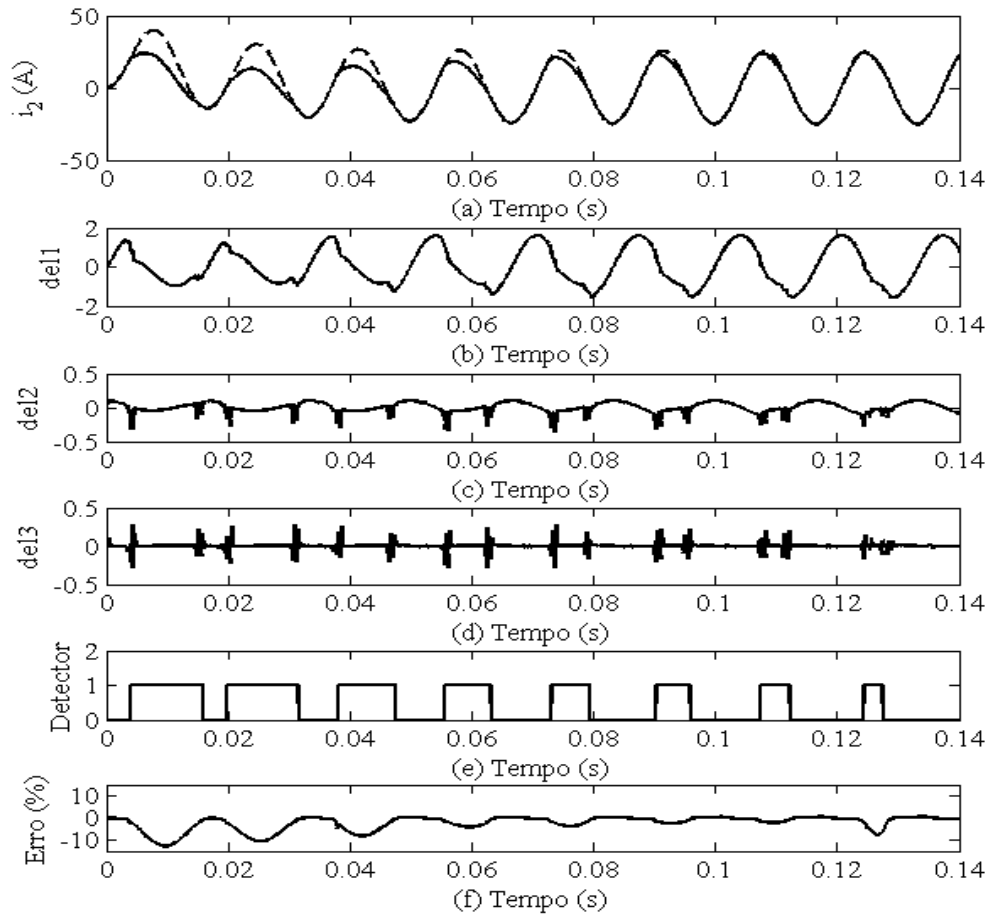


Figura 4.44 – Resultados para a combinação entre detecção através das funções-diferença e correção por corrente de magnetização. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Primeira função-diferença (del1). (c) Segunda função-diferença (del2). (d) Terceira função-diferença (del3). (e) Detector de saturação. (f) Erro transitório percentual.

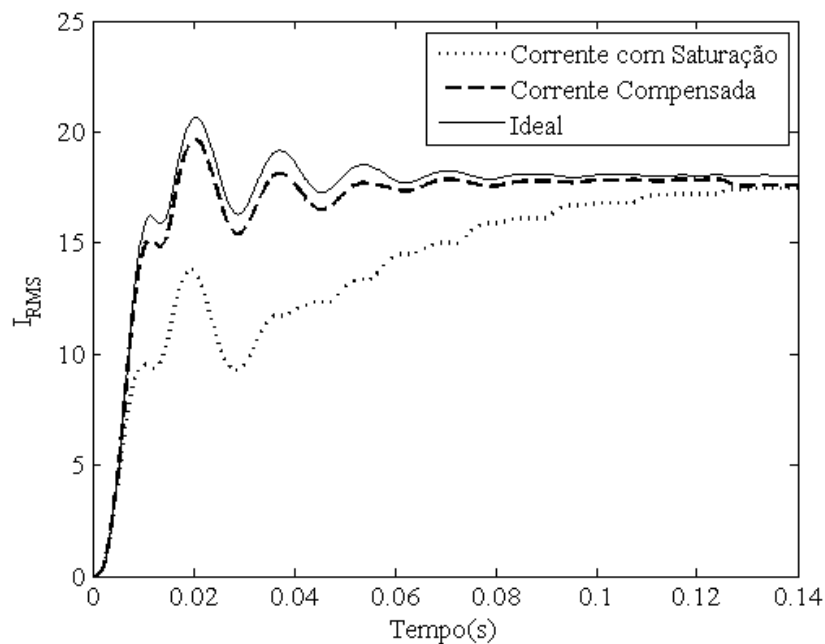


Figura 4.45 – Valores RMS para a combinação entre detecção através das funções-diferença e correção por corrente de magnetização.

#### 4.3.3.4 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação por Morfologia Matemática e Correção por Mínimos Quadrados

A detecção por *Morfologia Matemática* determinou com boa precisão os intervalos de saturação presentes no sinal. Nos dois primeiros trechos distorcidos, a detecção foi antecipada em uma amostra, o que prejudicou o desempenho da compensação.

Durante os dois primeiros intervalos de saturação detectados, o erro transitório percentual foi elevado, não ultrapassando o valor absoluto máximo de 16,6184% (erro ocorrido durante a compensação do segundo trecho saturado). Esses valores ocorrem em consequência da utilização de poucos pontos anteriores aos respectivos trechos distorcidos para a estimação dos parâmetros característicos do sinal, o que acontece devido à antecipação na detecção de tais intervalos. Além disso, a característica da forma de onda do sinal saturado, durante os trechos considerados nos cálculos, também contribuiu para esse erro. Os resultados para essa análise são mostrados na Figura 4.46.

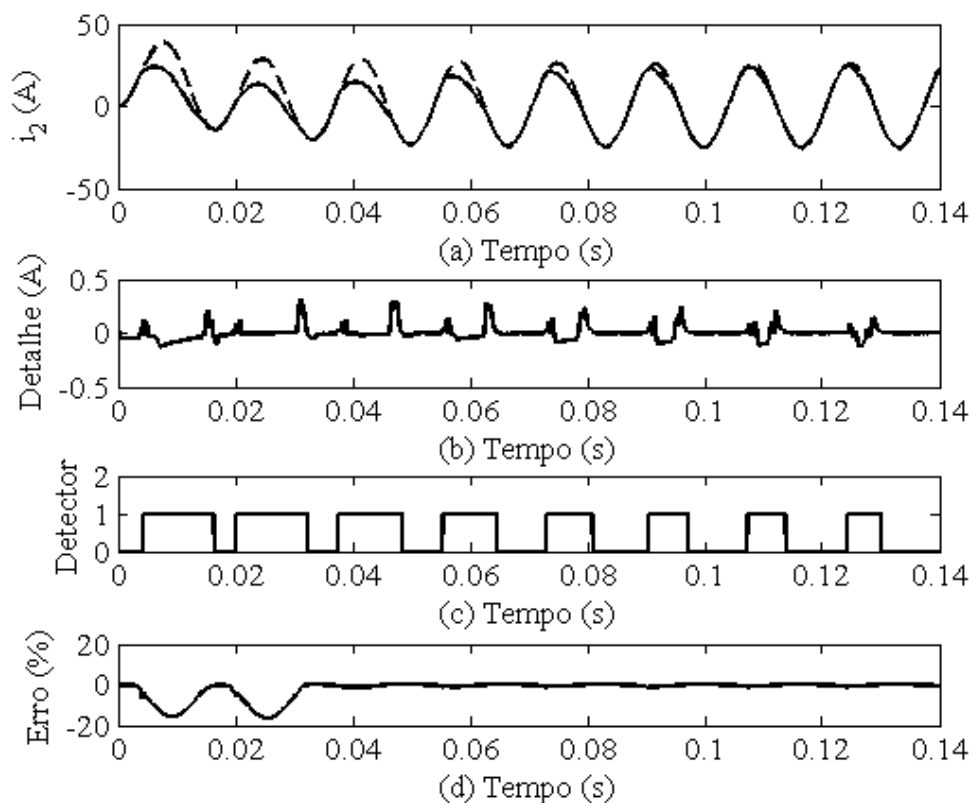


Figura 4.46 – Resultados para a combinação entre detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Detalhe do sinal obtido pela morfologia matemática. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

Na Figura 4.47, pode-se notar a aproximação ruim entre os valores RMS do sinal corrigido e do sinal ideal até, aproximadamente, 0,04 segundos. Isso ocorre devido ao erro



elevado durante a compensação dos dois primeiros intervalos de saturação. Após 0,04 segundos, a aproximação entre os valores RMS desses sinais é muito boa, em consequência da precisão da compensação.

Também, vale ressaltar que uma grande melhora em relação ao sinal distorcido original foi conseguida pela compensação do mesmo, independentemente do erro elevado durante a correção dos dois primeiros trechos saturados, conforme pode ser observado através da Figura 4.47.

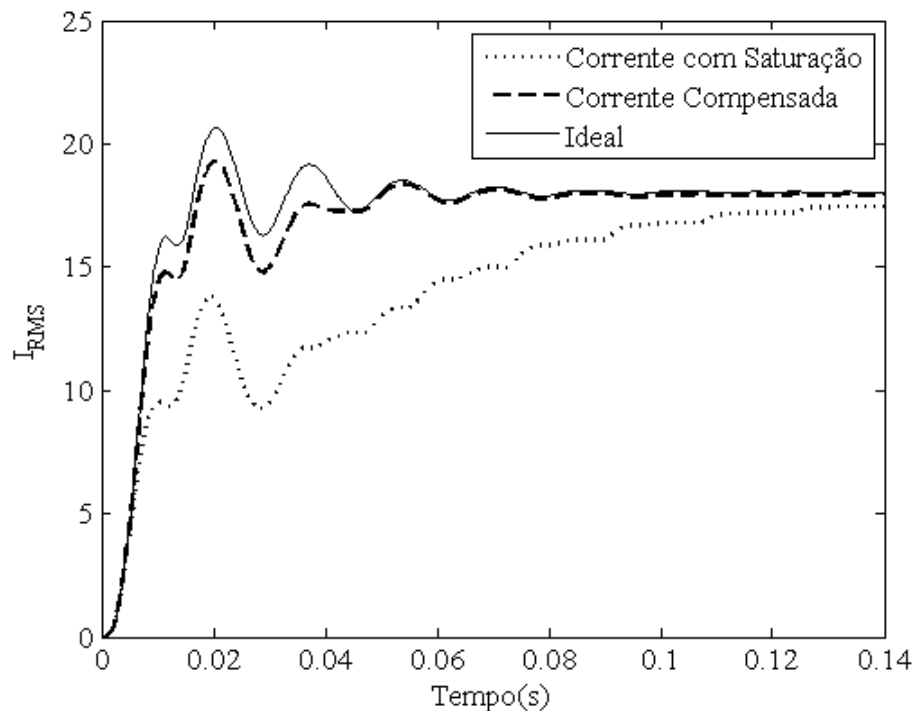


Figura 4.47 – Valores RMS para a combinação entre detecção através da morfologia matemática e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado.

#### 4.3.3.5 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação Através do Ângulo Formado entre as Diferenças do Sinal de Corrente e Correção por Mínimos Quadrados

Essa metodologia de detecção apresentou alguns problemas durante a análise desse caso. Foram detectados os oito intervalos de saturação presentes no sinal. Entretanto, a detecção do segundo trecho distorcido foi antecipada em duas amostras, o que prejudicou o desempenho da compensação, da mesma forma do ocorrido para a detecção por *Morfologia Matemática*, que foi descrito na Seção 4.3.3.4. Também, os finais do terceiro, do quinto e do oitavo intervalo de saturação não foram detectados. Porém, quando o tempo máximo permitido ao método para detecção dos respectivos fins foi atingido, foram atribuídos zeros ao

detector, limitando os trechos a serem corrigidos. A Figura 4.48 mostra os resultados obtidos para essa combinação.

O gráfico (e) da Figura 4.48 mostra o erro transitório percentual da correção, que não ultrapassou o valor absoluto de 27,3051%. Esse erro ocorre durante o segundo trecho compensado, em função da quantidade de pontos envolvida no cálculo de  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda$  e  $B$ , somada à característica do sinal no trecho não saturado anterior ao respectivo intervalo de saturação.

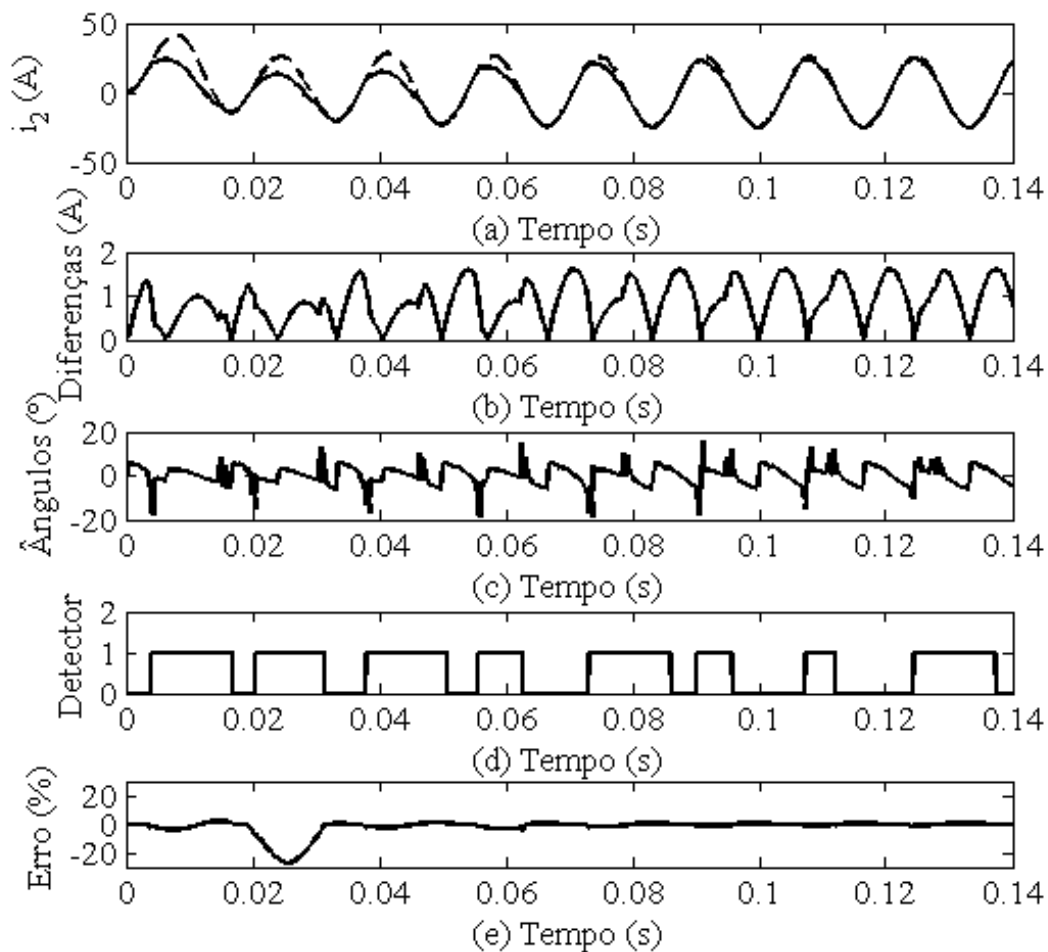


Figura 4.48 – Resultados para a combinação entre detecção através do ângulo formado entre as diferenças do sinal de corrente e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valor absoluto das diferenças. (c) Ângulo formado entre as diferenças. (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

A Figura 4.49 mostra os valores RMS para a compensação, que se aproximaram bastante dos valores ideais, exceto no trecho influenciado pela correção do segundo intervalo de saturação.

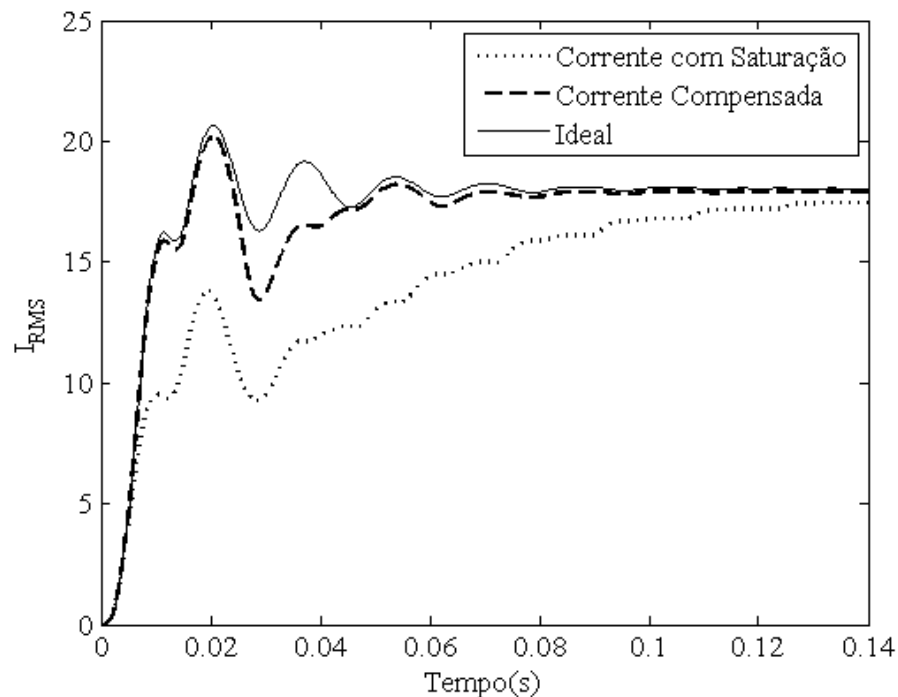


Figura 4.49 – Valores RMS para a combinação entre detecção através do ângulo formado entre as diferenças do sinal de corrente e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado.

#### 4.3.3.6 Resultados para a Detecção dos Intervalos de Saturação Através da Terceira Derivada e Correção por Mínimos Quadrados

Para essa combinação, os resultados são mostrados na Figura 4.50. A metodologia de detecção encontrou o início do primeiro intervalo de saturação com atraso equivalente a uma amostra. O fim desse intervalo foi antecipado em uma amostra. Isso fez com que o erro transitório percentual fosse maior durante a compensação desse trecho.

O segundo intervalo de saturação também teve a detecção do seu início atrasada em uma amostra, o que, somado a utilização de um ponto do trecho saturado anterior durante a estimação dos parâmetros característicos, contribuiu para um elevado erro durante a compensação desse intervalo. Os demais trechos distorcidos foram detectados com atrasos de uma amostra e os respectivos fins foram antecipados em uma amostra. Isso não afetou o desempenho da correção, visto que a partir do quarto intervalo de saturação, a distorção já não é tão severa.

Apesar do erro elevado durante a compensação dos dois primeiros intervalos de saturação, a metodologia de correção obteve bons resultados, e o erro transitório não ultrapassou o valor absoluto máximo de 11,6202%. Nenhum intervalo de saturação foi detectado após 0,12 segundos.

Além disso, os valores RMS para o sinal corrigido são mostrados na Figura 4.51. Nota-se a boa aproximação em relação aos valores ideais e a melhora atribuída ao sinal após a correção do mesmo.

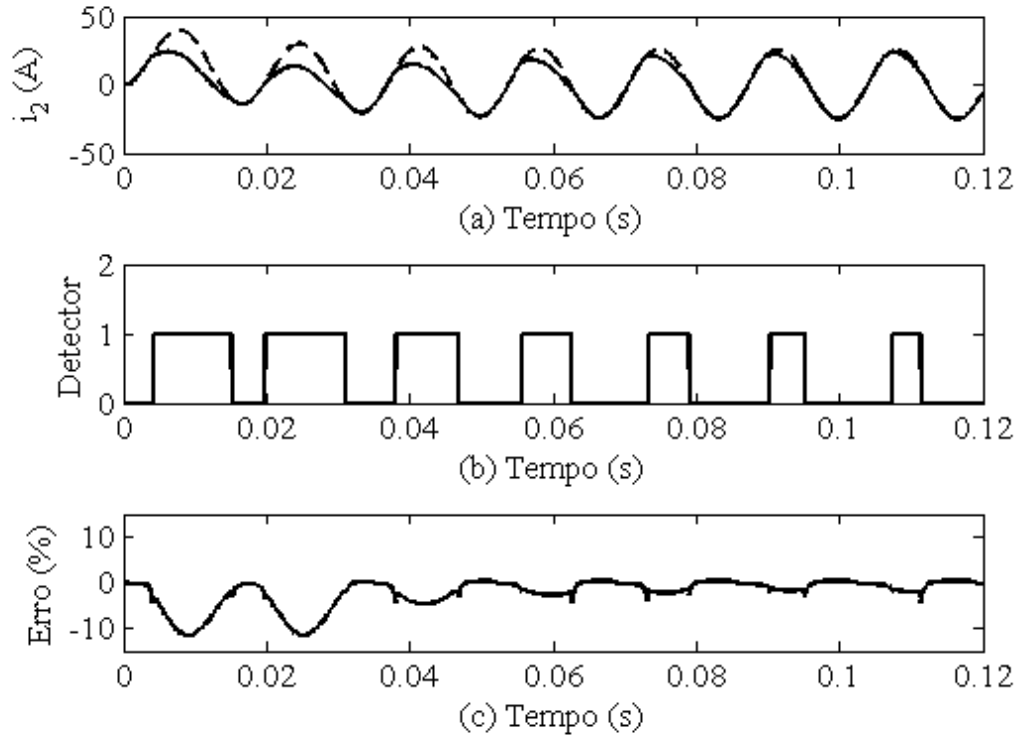


Figura 4.50 – Resultados para a combinação entre detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Detector de saturação. (c) Erro transitório percentual.

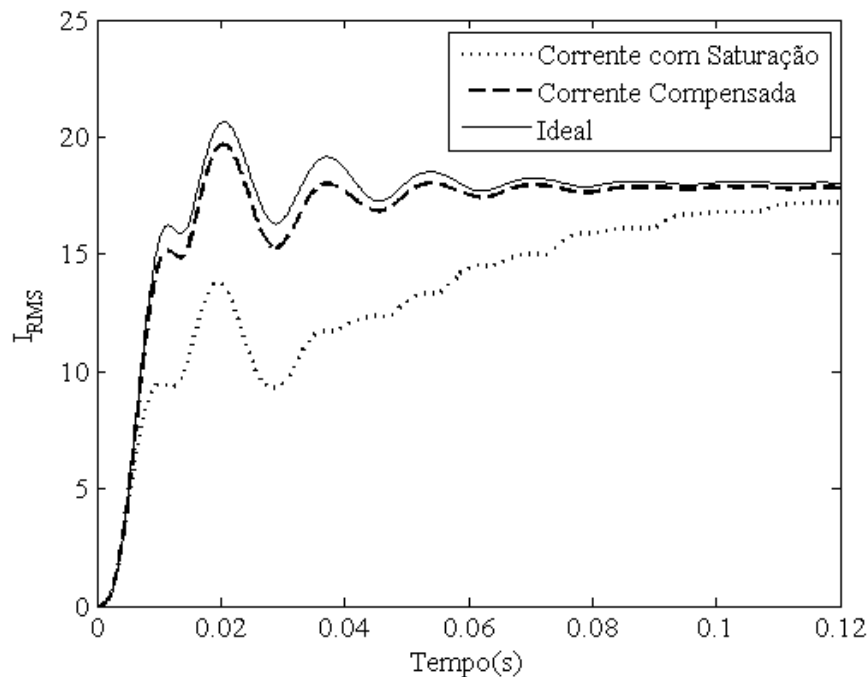


Figura 4.51 – Valores RMS para a combinação entre detecção através da terceira derivada e correção por mínimos quadrados após cada intervalo detectado.

#### 4.3.3.7 Resultados para a Detecção da Saturação Através da Distância Entre Pontos Consecutivos nos Planos Formados por Amostras de Corrente Secundária e suas Funções-Diferença e Correção por Mínimos Quadrados Utilizando Apenas Pontos Anteriores ao Respeetivo Intervalo de Saturação

Apesar do bom desempenho da metodologia de detecção, os erros transitórios para essa compensação foram elevados durante a correção dos três primeiros intervalos de saturação. Por utilizar somente pontos anteriores aos respectivos intervalos de saturação, o erro da correção torna-se expressivo antes do final dos referidos intervalos, fazendo com que os valores do sinal corrigido sejam bem menores do que os valores amostrados. Em consequência disso, esses valores foram descartados e mantidos os valores do sinal amostrado. Mesmo assim, o valor absoluto máximo do erro transitório percentual atinge 75,7363%. Os resultados dessa combinação aparecem na Figura 4.52.

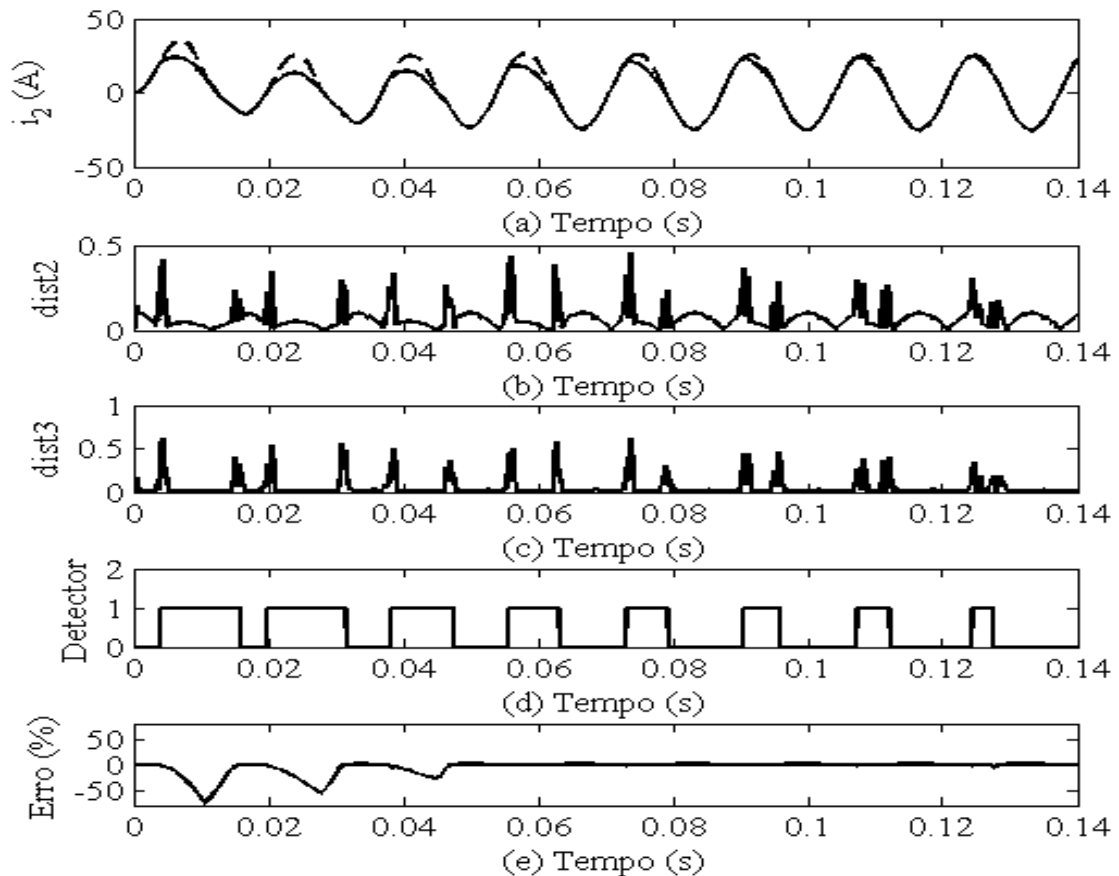


Figura 4.52 – Detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores a cada intervalo de saturação. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valores das distâncias no plano  $del_2 \times del_1$ . (c) Valores das distâncias no plano  $del_3 \times del_2$ . (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

Os valores RMS da compensação são mostrados na Figura 4.53, onde é possível notar que o desempenho da correção deixa a desejar nos três primeiros intervalos de saturação, devido ao maior erro transitório durante esse trecho. Após a correção da terceira porção distorcida, o erro da correção diminuiu, melhorando o desempenho da mesma, o que promove uma boa aproximação em relação aos valores RMS ideais.

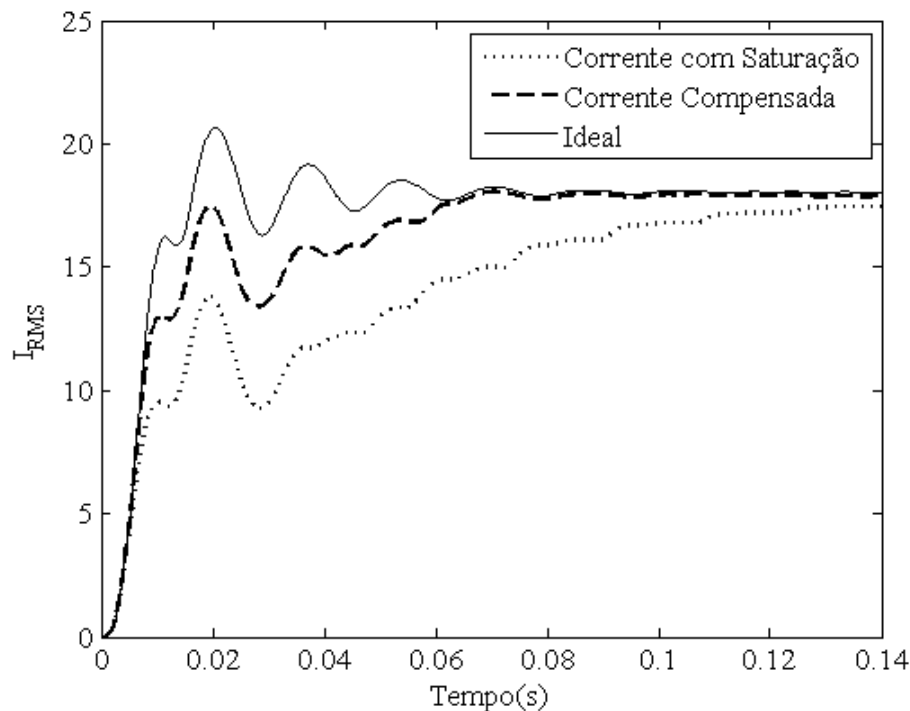


Figura 4.53 – Valores RMS para a combinação entre detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores a cada intervalo de saturação.

#### 4.3.3.8 Resultados para a Detecção da Saturação Através da Distância Entre Pontos Consecutivos nos Planos Formados por Amostras de Corrente Secundária e suas Funções-Diferença e Correção por Mínimos Quadrados

O desempenho da detecção é o mesmo obtido para a análise anterior. Todos os intervalos de saturação foram adequadamente detectados. Como esperado, a utilização de pontos anteriores e posteriores aos respectivos intervalos de saturação proporciona melhor precisão ao processo de correção. O erro transitório percentual para essa análise não ultrapassou o valor absoluto de 8,1199%, ocorrido durante a compensação do segundo trecho distorcido. Os resultados para essa combinação aparecem na Figura 4.54.

Além disso, os valores RMS obtidos para o processo de correção são mostrados na Figura 4.55. Nessa Figura, é possível notar a boa aproximação do sinal corrigido em relação aos valores ideais.

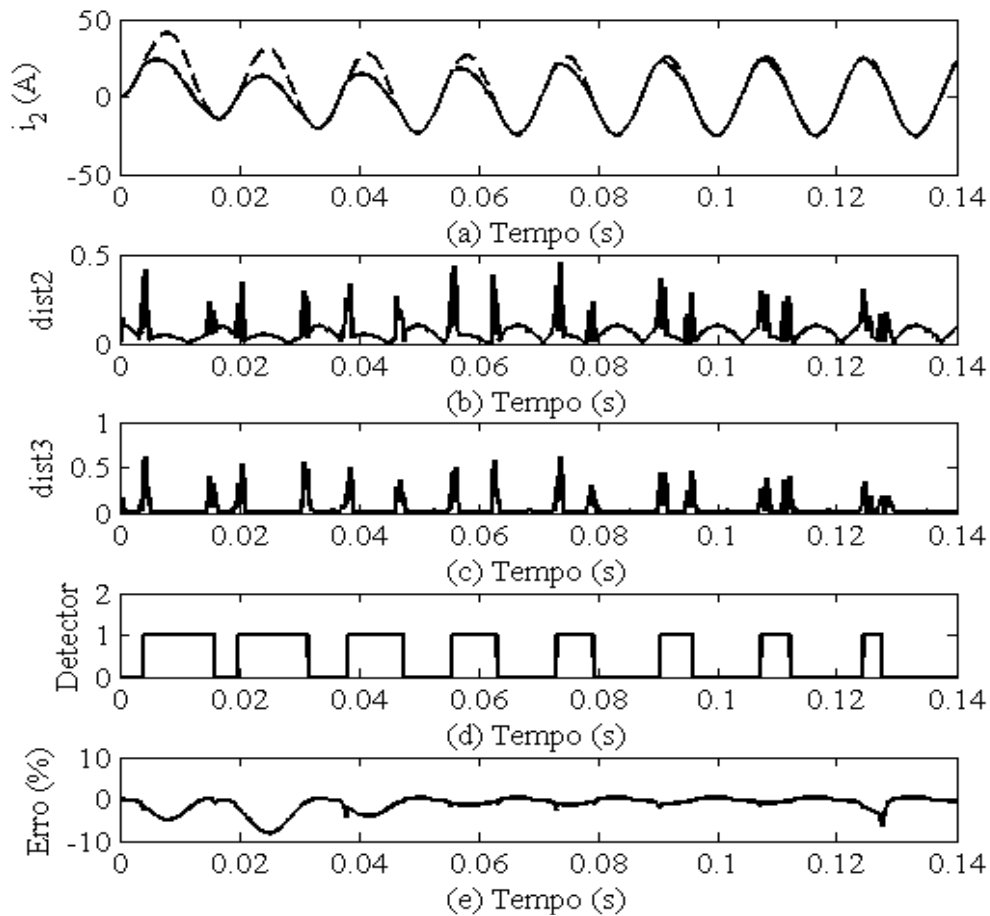


Figura 4.54 – Detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valores das distâncias no plano del2 x del1. (c) Valores das distâncias no plano del3 x del2. (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

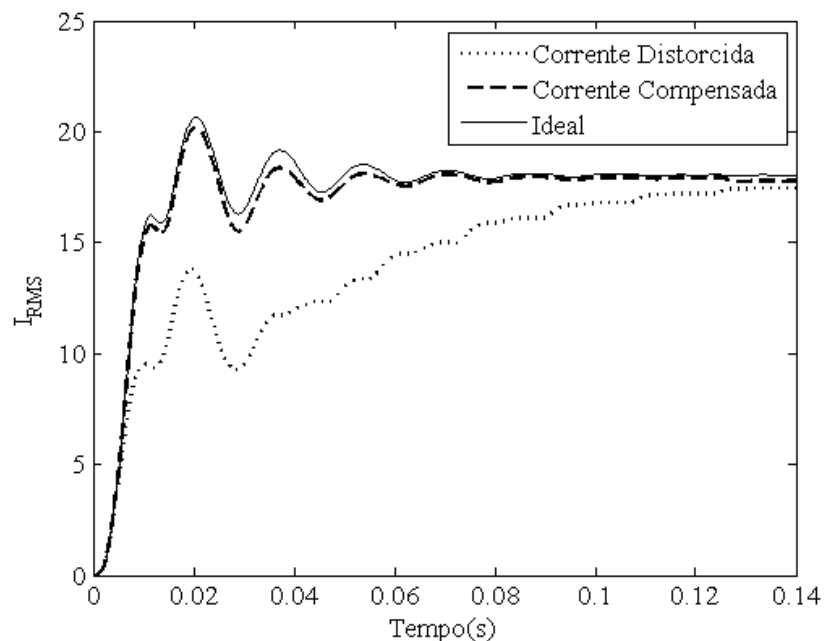


Figura 4.55 – Valores RMS para a combinação entre detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação.

#### 4.3.4 Testes Complementares I: Falta Monofásica, Carga Resistiva de 10 $\Omega$ , Fluxo Remanescente de 0% e 80%

O aumento da resistência conectada ao secundário do TC propiciou distorções severas ao sinal de corrente secundária, que apresentam variações bruscas e de maior intensidade nos pontos que caracterizam início e fim dos intervalos de saturação. Entretanto, a severidade dessas distorções é mais relevante durante os quatro primeiros ciclos do sinal, mantendo os níveis de corrente secundária abaixo dos valores reais de curto-circuito referidos ao secundário do TC.

Para a situação envolvendo 0% de fluxo remanescente, a metodologia proposta por PAN *et al.* (2004) para compensação dos sinais secundários através do método de ajuste de curvas por mínimos quadrados, iniciando a partir do segundo ciclo do sinal, obteve bom desempenho. O erro transitório percentual máximo foi de 5,9043% em módulo.

Já a aplicação dessa técnica, corrigindo o sinal a partir do primeiro ciclo, teve valor absoluto máximo de erro transitório de 18,1725%, durante a compensação do primeiro trecho saturado. Isso ocorreu em consequência da utilização de somente pontos anteriores ao respectivo trecho saturado. Contudo, o erro transitório para o restante da correção não ultrapassou 6%. Além disso, os valores RMS do sinal corrigido tiveram boa aproximação em relação aos valores ideais para ambas as aplicações.

Os melhores resultados foram obtidos pela metodologia combinando *Transformada Wavelet* para detecção dos intervalos de saturação e compensação pela técnica de regressão descrita na Seção 3.4.2. Foram detectados oito intervalos de saturação com boa precisão, o que contribuiu para o bom desempenho da correção. O valor absoluto máximo do erro transitório da compensação foi de 3,2425%. Os resultados para essa combinação aparecem na Figura 4.56 e os valores RMS obtidos para o sinal corrigido são mostrados na Figura 4.57.

Todas as demais metodologias de detecção envolvidas nos estudos determinaram a existência de sete intervalos de saturação. Tendo em vista que o oitavo trecho saturado existente no sinal é de curta duração e distorção desprezível, a detecção desse intervalo é irrelevante para a compensação do sinal.

A combinação entre detecção através da terceira função-diferença do sinal e correção através da corrente de magnetização apresentou bons resultados. O penúltimo intervalo de saturação detectado não teve seu final determinado. Entretanto, quando o tempo máximo permitido ao método para detecção desse ponto foi atingido, um zero foi atribuído ao detector,



limitando o intervalo a ser corrigido. Isso não afetou o desempenho da compensação, já que o erro transitório máximo foi de 8,3024% em módulo.

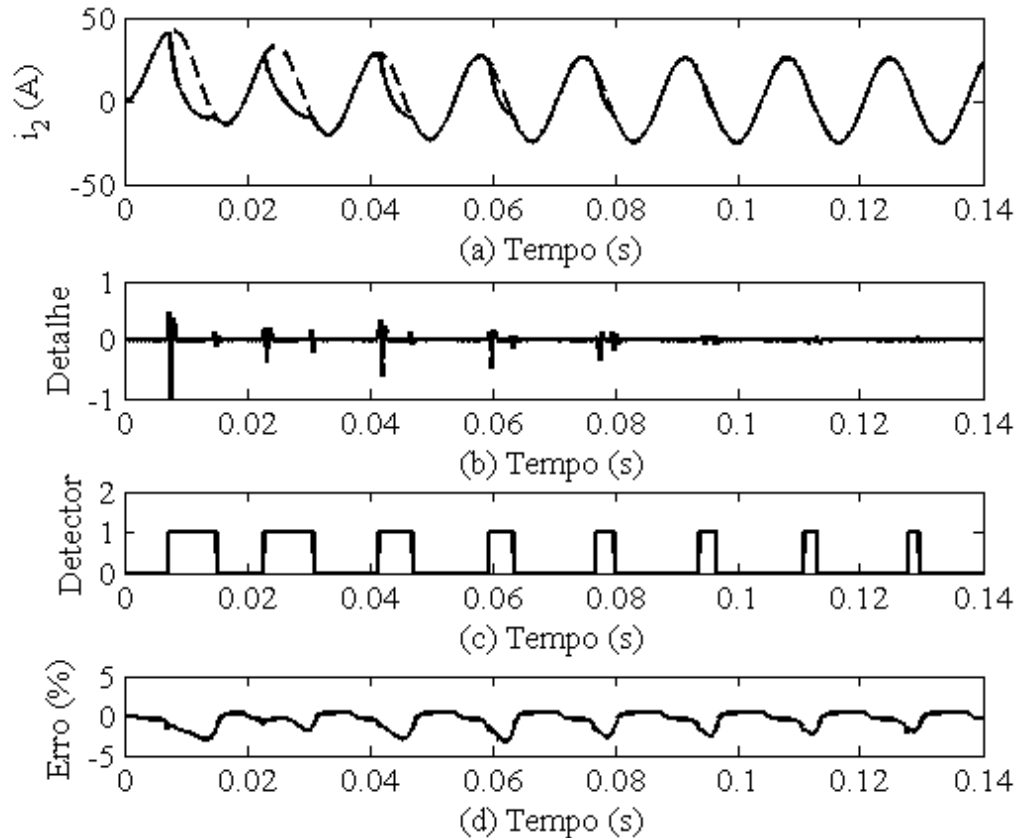


Figura 4.56 – Resultados para a combinação entre detecção por transformada wavelet e correção por técnica de regressão. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

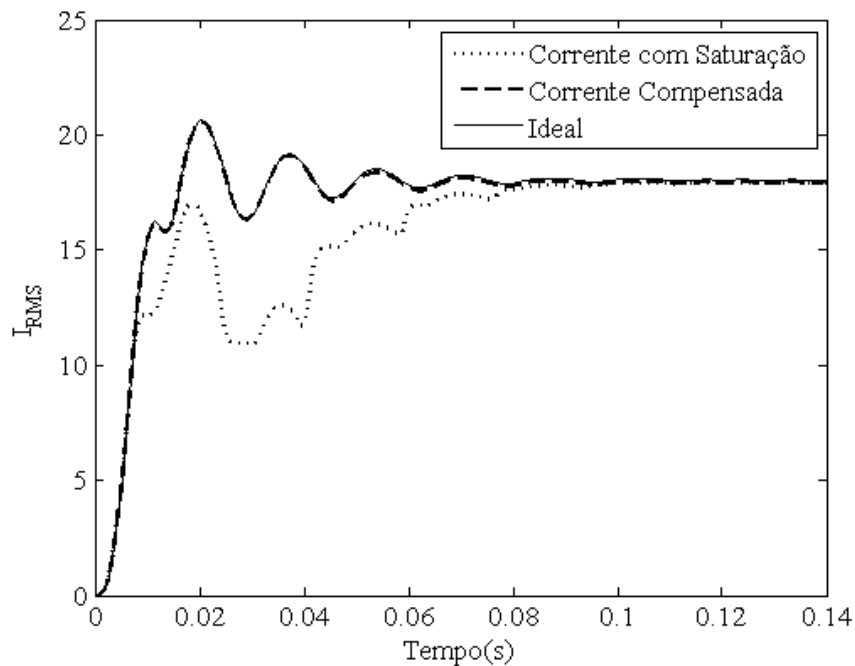


Figura 4.57 – Valores RMS para a combinação entre detecção por transformada wavelet e correção por regressão.

As combinações entre técnicas para detecção e o método de ajuste de curvas por mínimos quadrados, utilizando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação, apresentaram bons desempenhos, não ultrapassando o valor absoluto de 6,5% para o erro transitório das compensações e obtendo boa aproximação com relação aos valores RMS ideais. A única exceção foi a metodologia que utiliza terceira derivada para detecção, que devido ao atraso em duas amostras na determinação do início do quinto intervalo de saturação, apresentou erro transitório percentual de 14,1974%. Apesar disso, os valores RMS para o sinal corrigido aproximaram-se bastante dos valores ideais.

Vale ressaltar ainda que, novamente, a metodologia de detecção a partir dos ângulos formados entre as diferenças do sinal de corrente secundária apresentou problemas, não detectando os finais de saturação do quinto, do sexto e do sétimo trecho distorcidos por saturação. Contudo, esses intervalos foram limitados pela lógica que atribui zero ao detector, quando o tempo máximo para determinação dos respectivos fins foi atingido.

Também, é importante destacar que a técnica de detecção através da distância entre pontos consecutivos dos planos del2 x del1 e del3 x del2 não foi capaz de detectar o final do sexto intervalo de saturação, o qual teve de ser limitado pelo algoritmo de tempo máximo para determinação do fim do trecho distorcido.

O pior desempenho em termos de erro transitório percentual para esse caso, foi da metodologia combinando detecção pela distância entre pontos consecutivos nos planos del2 x del 1 e del3 x del2 e correção por mínimos quadrados, envolvendo somente pontos anteriores a cada intervalo de saturação. O valor absoluto máximo dessa compensação foi de 22,4908% e ocorreu durante a correção do primeiro intervalo de saturação. Os resultados para essa combinação aparecem na Figura 4.58.

Apesar do erro transitório elevado durante a compensação do primeiro trecho distorcido, os valores RMS do sinal corrigido aproximam-se bastante dos valores ideais. Isso pode ser visto na Figura 4.59.

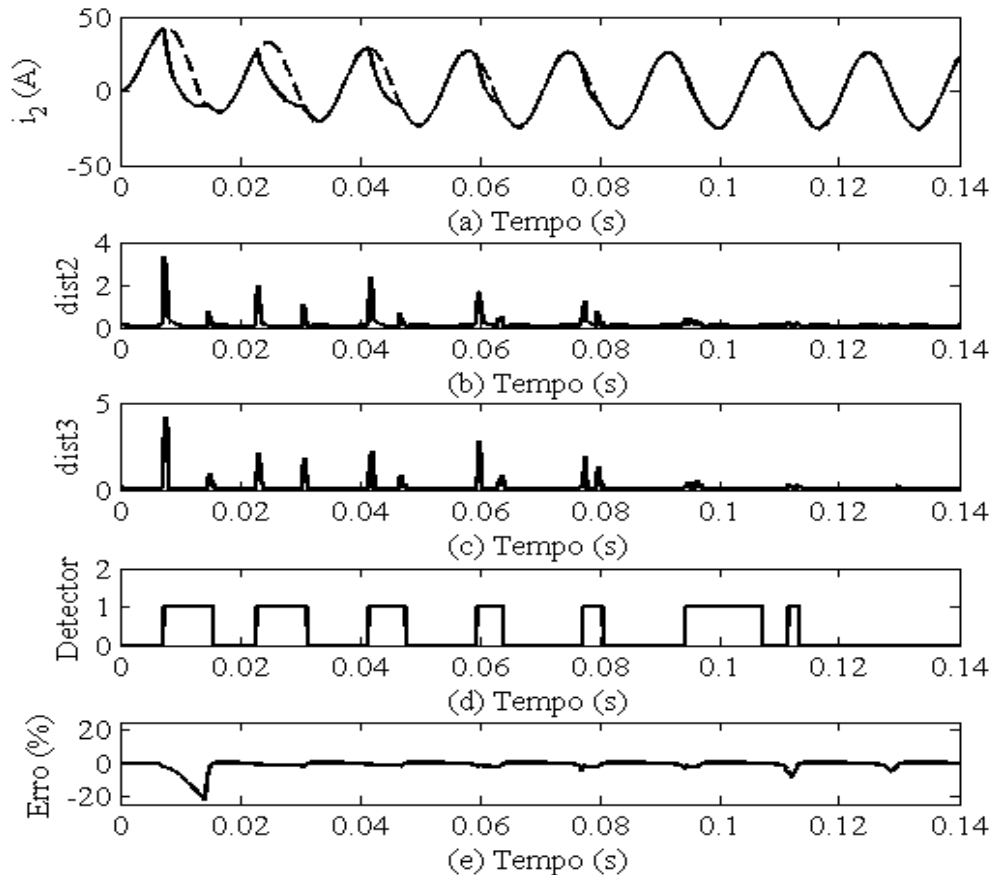


Figura 4.58 – Detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores a cada intervalo de saturação. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valores das distâncias no plano  $del2 \times del1$ . (c) Valores das distâncias no plano  $del3 \times del2$ . (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

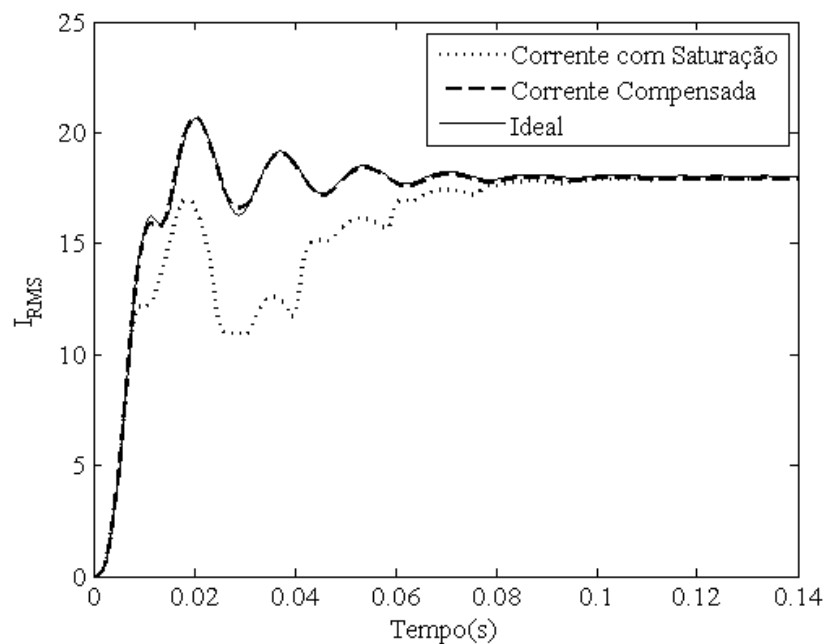


Figura 4.59 – Valores RMS para a combinação entre detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores a cada intervalo de saturação.

Para o caso envolvendo 80% de fluxo remanescente no núcleo do TC, o sinal começa a ser distorcido logo após o início da falta, promovendo uma distorção mais severa durante o primeiro ciclo do sinal. Para o restante do sinal, as distorções são semelhantes às aquelas verificadas para o caso sem fluxo remanescente.

Tendo em vista que a presença de fluxo remanescente apenas diminui o tempo até a saturação, verificou-se que o desempenho das metodologias de detecção foi semelhante ao observado durante a análise do caso não envolvendo fluxo remanescente. Por isso, as mesmas observações com relação às metodologias de detecção feitas durante a análise sem fluxo remanescente, aplicam-se a este caso.

Em relação ao erro transitório da compensação, verificou-se que a combinação entre detecção por *Transformada Wavelet* e correção por técnica de regressão, novamente, obteve os melhores resultados. Esses resultados podem ser vistos na Figura 4.60. O erro transitório percentual para essa compensação não ultrapassou o valor de 3,2426% em módulo. Os valores RMS para o sinal corrigido são mostrados na Figura 4.61, onde é possível notar a excelente aproximação da correção com relação aos valores RMS ideais.

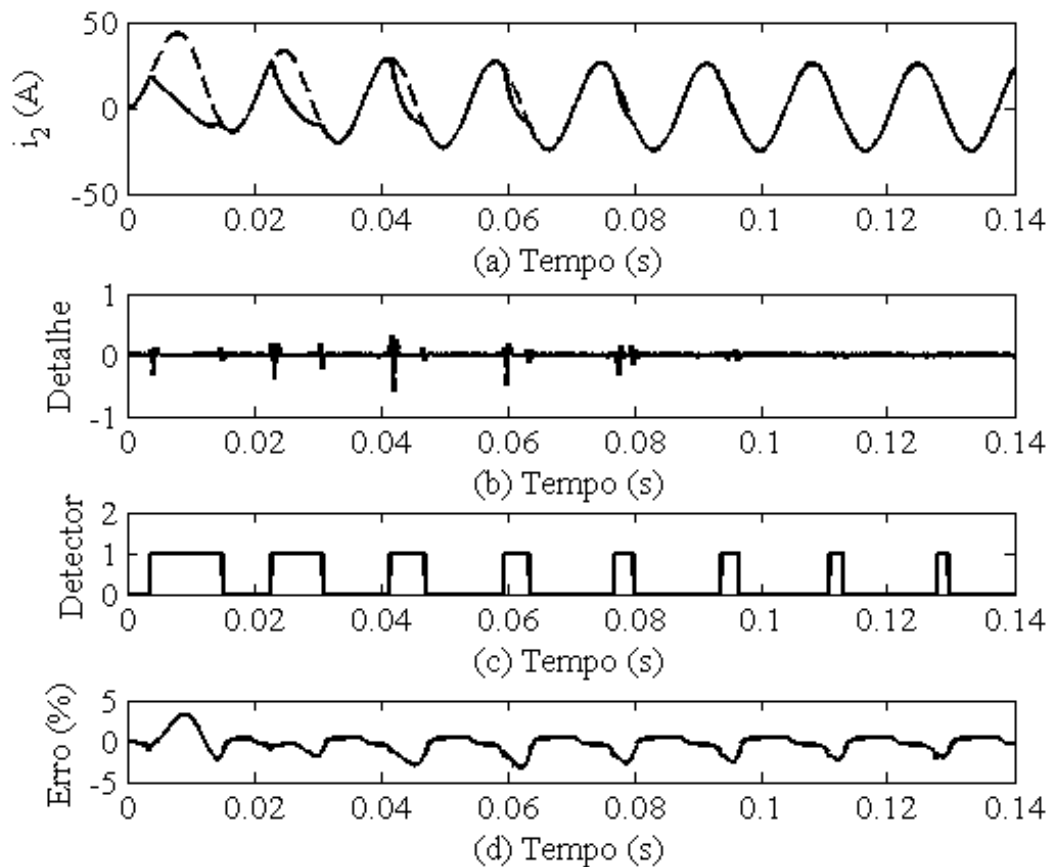


Figura 4.60 – Resultados para a combinação entre detecção por transformada wavelet e correção por técnica de regressão. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Detalhe do sinal. (c) Detector de saturação. (d) Erro transitório percentual.

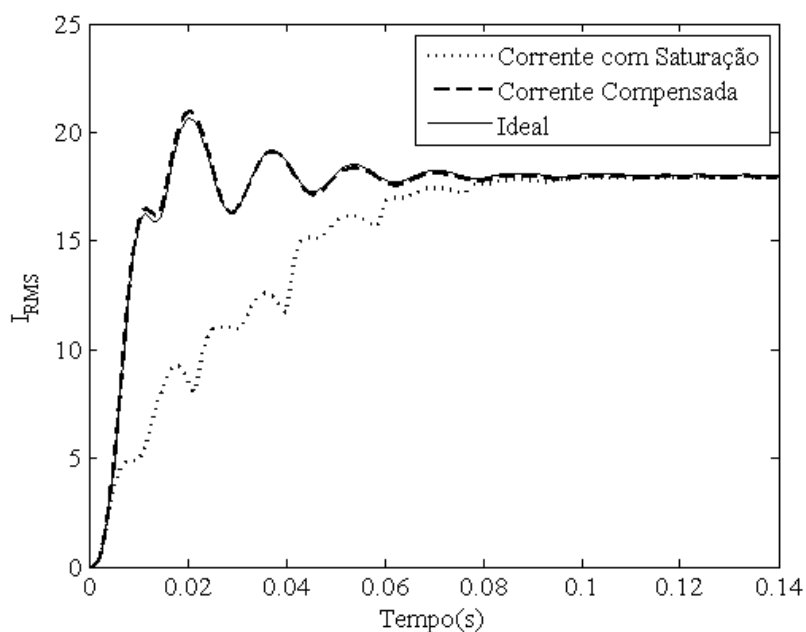


Figura 4.61 – Valores RMS para a combinação entre detecção por transformada wavelet e correção por regressão.

As demais metodologias de compensação analisadas tiveram seus desempenhos afetados pela precisão das respectivas técnicas de compensação associadas. Para as metodologias propostas por PAN *et al.* (2004), o valor absoluto máximo do erro transitório percentual da compensação foi de 5,8977% para a aplicação a partir do segundo ciclo do sinal, e de 73,3035% para a aplicação da correção a partir do primeiro ciclo. Para a segunda aplicação, o erro transitório é elevado durante a correção do primeiro trecho distorcido. Isso ocorre devido à característica do trecho não saturado anterior utilizado durante a compensação desse trecho. As Figuras 4.62 e 4.63 mostram os resultados para essa correção. A aproximação ruim entre os valores RMS do sinal corrigido e do sinal ideal durante os dois primeiros ciclos pode ser verificada através da Figura 4.63.

Para a técnica de correção por corrente de magnetização, o erro transitório percentual da correção não ultrapassou o módulo de 11,1209%.

As combinações entre a técnica de correção por mínimos quadrados, utilizando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação, e as técnicas de detecção por *Morfologia Matemática* e *Terceira Derivada*, apresentaram erros inferiores a 15%. Os valores máximos de erro para essas combinações ocorreram durante intervalos de saturação detectados com atraso de uma amostra. Para as demais combinações envolvendo essa técnica de correção por mínimos quadrados, o erro transitório percentual não foi superior 6,5% em módulo.

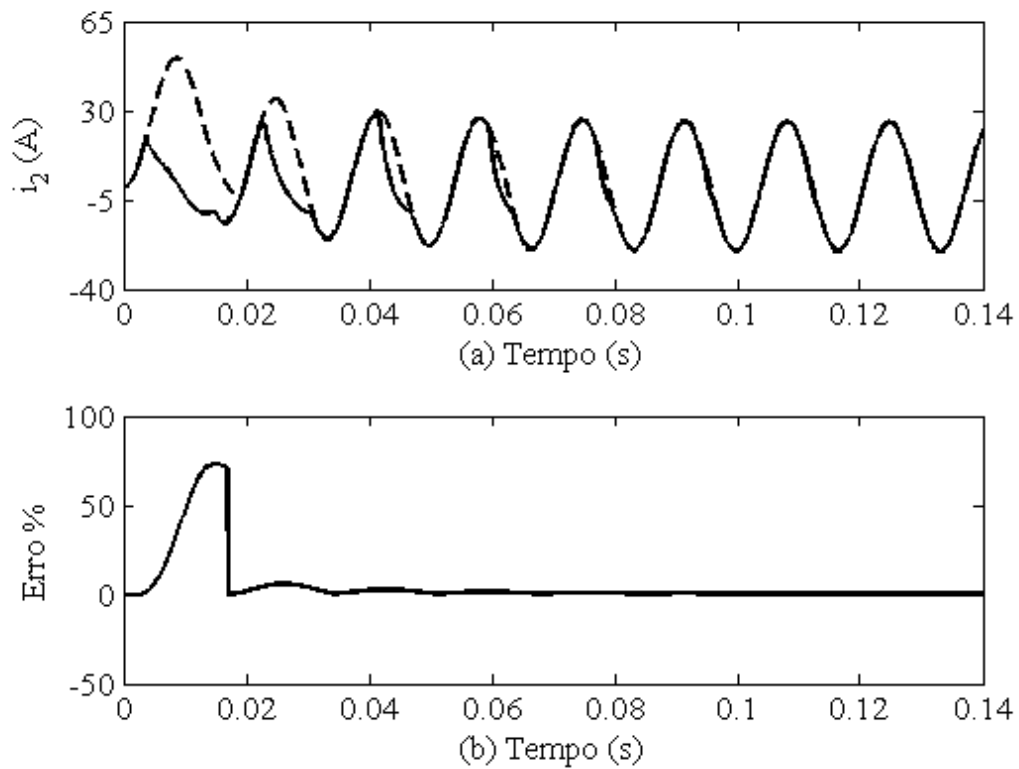


Figura 4.62 – Resultados para a correção a partir do primeiro ciclo utilizando mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Erro transitório percentual.

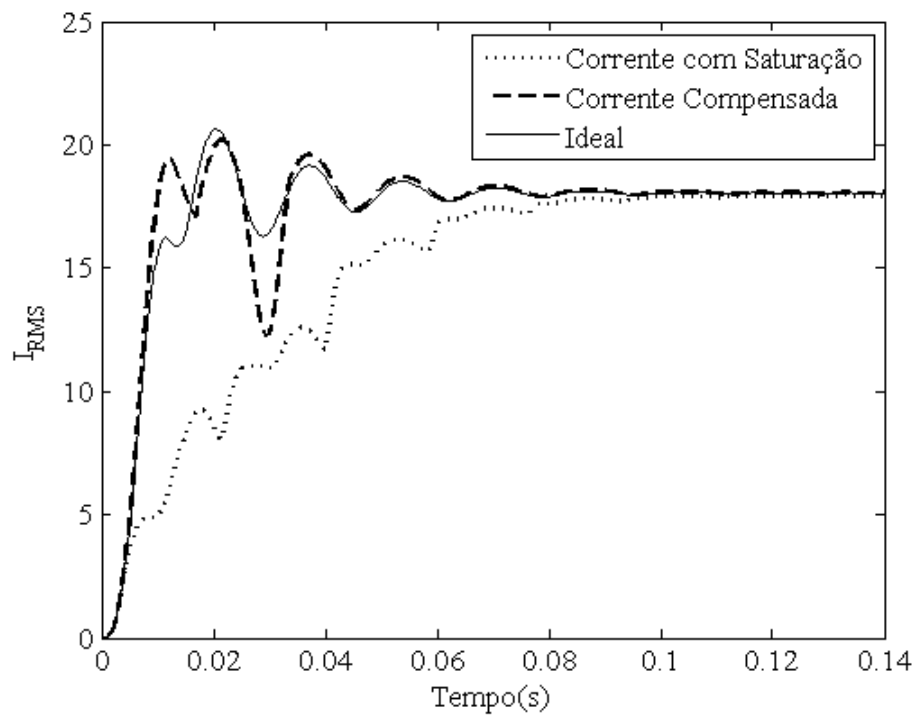


Figura 4.63 – Valores RMS para a correção a partir do primeiro ciclo utilizando mínimos quadrados.

O pior desempenho, em termos de erro transitório percentual e aproximação dos valores RMS ideais, foi obtido pela combinação entre a técnica de detecção através da distância entre pontos consecutivos nos planos del2 x del1 e del3 x del2 e correção por mínimos quadrados, utilizando somente pontos anteriores aos respectivos intervalos de saturação.

Além disso, os resultados para essa metodologia podem ser vistos nas Figuras 4.64 e 4.65. O erro transitório percentual para essa correção atinge o módulo de 100,1412% durante a compensação do primeiro trecho distorcido, o que prejudica a aproximação em relação aos valores RMS ideais nesse trecho (Figura 4.65).

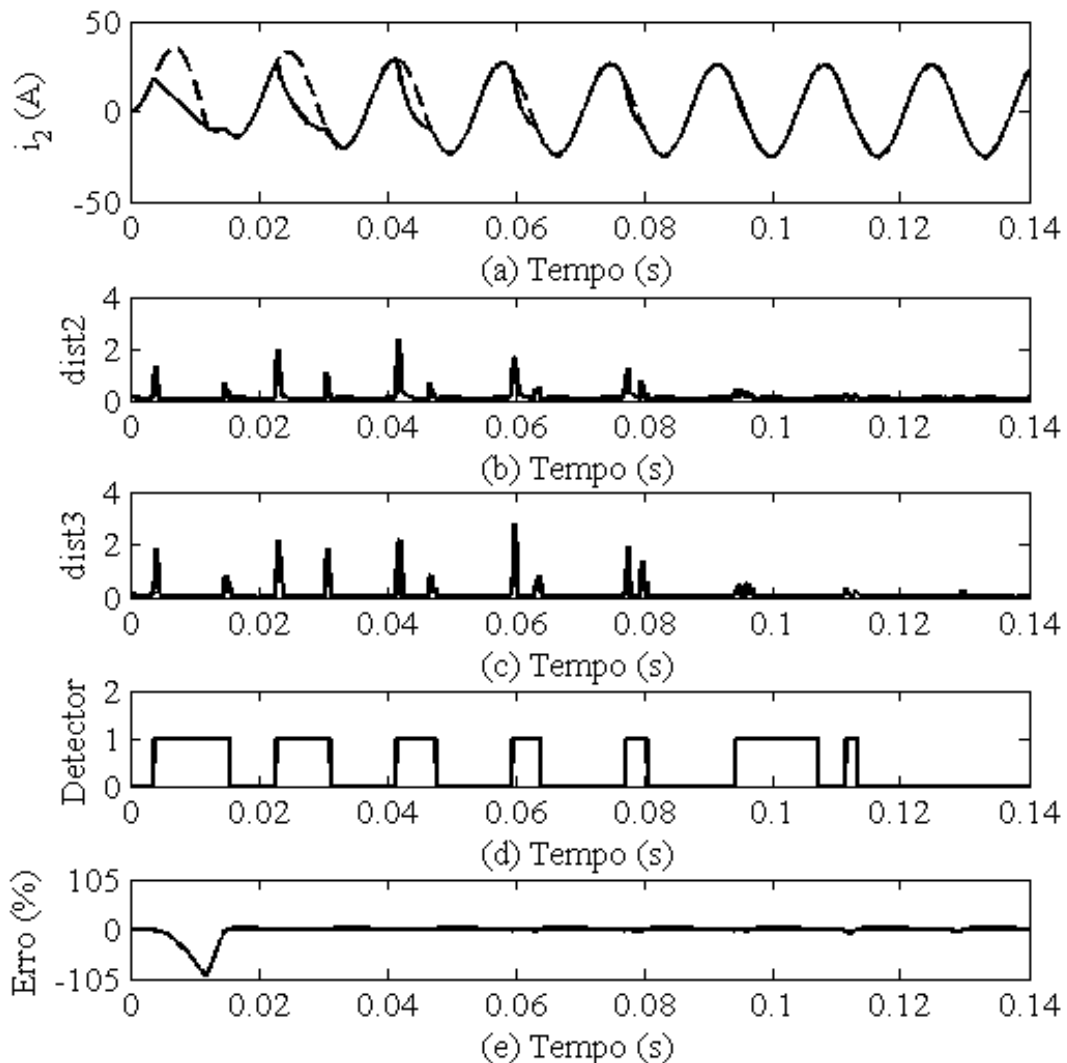


Figura 4.64 – Detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores a cada intervalo de saturação. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valores das distâncias no plano del2 x del1. (c) Valores das distâncias no plano del3 x del2. (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

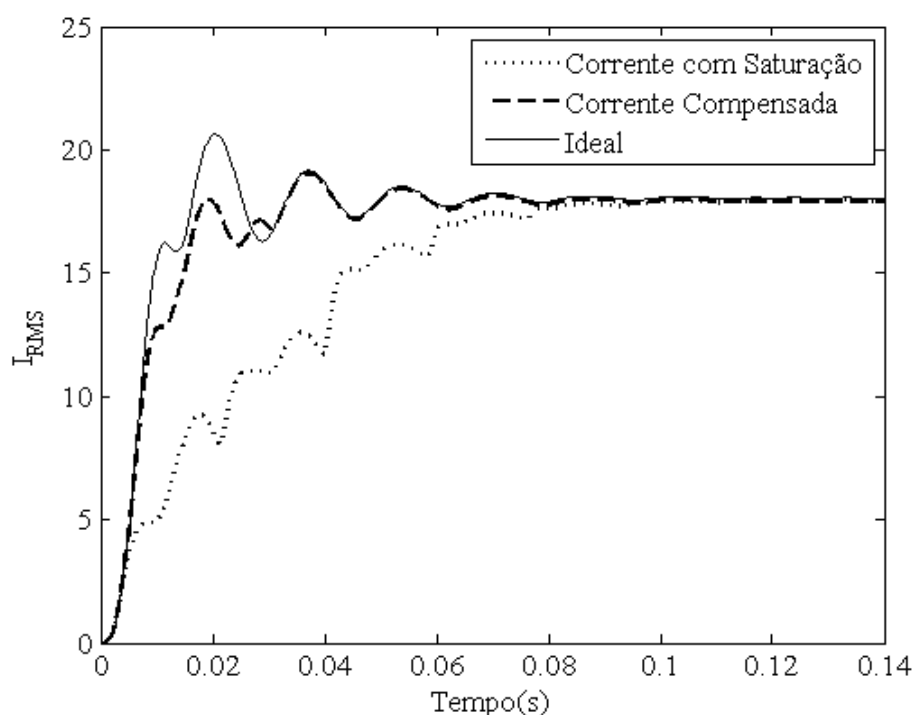


Figura 4.65 – Valores RMS para a combinação entre detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores a cada intervalo de saturação.

#### 4.3.5 Testes Complementares II: Falta Trifásica, Carga de 4 $\Omega$ , Fluxo Remanescente de 0% e 80%

Com o intuito de verificar o desempenho das metodologias analisadas para níveis maiores de curto-circuito, faltas trifásicas foram simuladas com 0 e 80% de fluxo remanescente no núcleo para uma carga resistiva de 4 ohms no secundário do TC. O valor RMS máximo da corrente de curto-circuito para uma falta trifásica nesse sistema é de 13852 A e o valor de regime permanente dessa corrente é de 12284 A RMS. Ambos os valores são referidos ao primário do TC.

Para o caso não envolvendo fluxo remanescente, a distorção do sinal de corrente secundária, em virtude da saturação, ocorre com maior severidade durante o segundo ciclo do mesmo. Todas as técnicas de detecção determinaram oito intervalos de saturação com boa precisão, o que contribuiu positivamente para o desempenho das respectivas técnicas de correção associadas. Nenhum final de saturação foi perdido.

A metodologia proposta por PAN *et al.* (2004) para correção a partir do segundo ciclo do sinal obteve o menor valor máximo de erro transitório, não ultrapassando o módulo de 2,0384%. Os resultados para essa técnica aparecem nas Figuras 4.66 e 4.67.



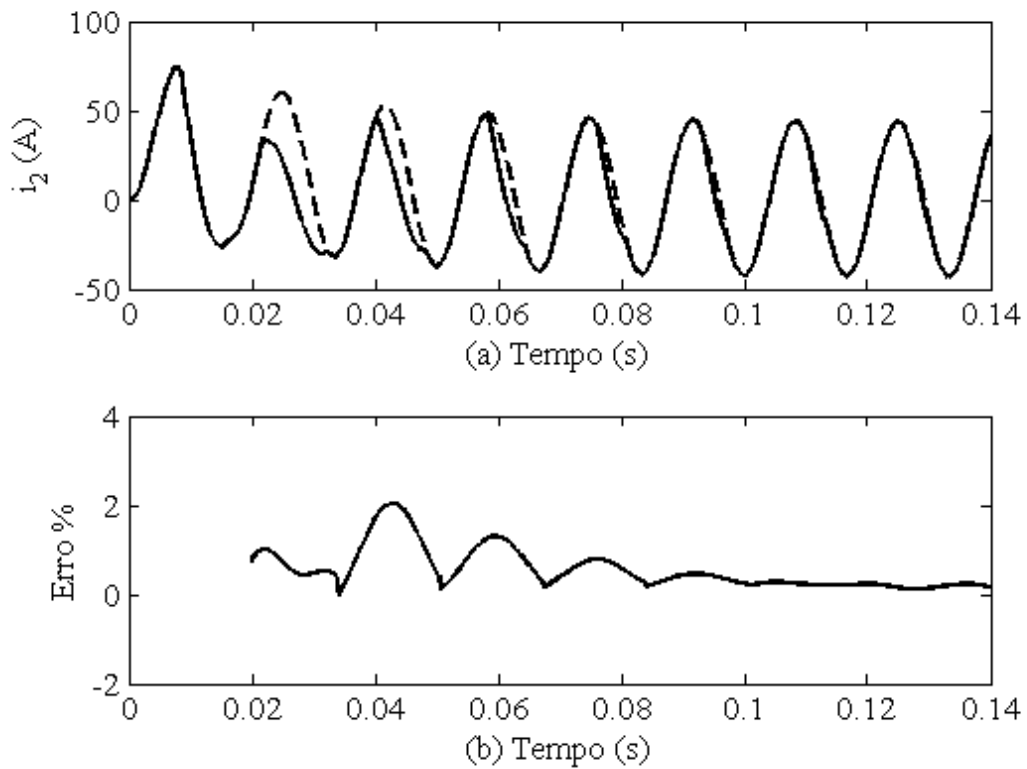


Figura 4.66 – Resultados para a correção a partir do segundo ciclo utilizando mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Erro transitório percentual.

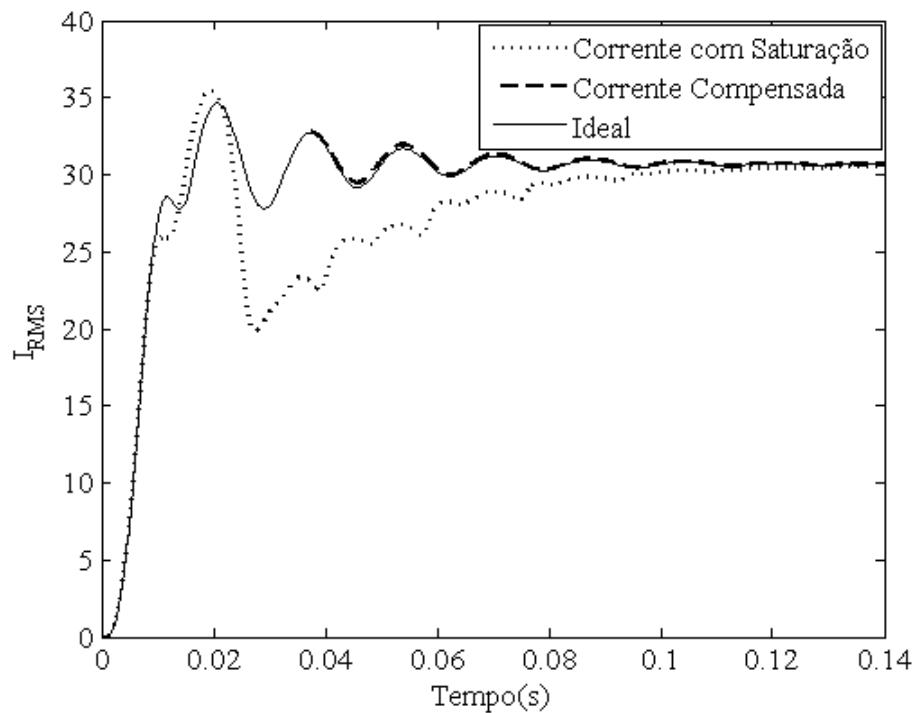


Figura 4.67 – Valores RMS para a correção a partir do segundo ciclo utilizando mínimos quadrados.

Já a proposta para correção por mínimos quadrados, aplicada a partir do primeiro ciclo, teve erro transitório máximo de 12,1169% em módulo. Esse valor ocorreu durante a compensação do primeiro trecho distorcido, devido à utilização de somente pontos anteriores ao respectivo intervalo de saturação. Durante a correção dos demais trechos saturados, o erro da compensação não ultrapassou o módulo de 2,1%.

Para a combinação entre *Transformada Wavelet* para detecção e técnica de regressão para correção das distorções presentes no sinal de corrente secundária, o erro transitório não excedeu 3,9145%. Além disso, a qualidade da compensação garantiu boa aproximação entre os valores RMS do sinal corrigido e os valores ideais de corrente secundária.

Um bom desempenho também foi verificado para a combinação entre detecção através da terceira função-diferença do sinal e correção por corrente de magnetização. O erro transitório percentual para essa correção teve valor absoluto máximo de 5,3689%, garantindo boa aproximação em relação ao valores RMS ideais após a correção do sinal distorcido.

A técnica de correção por mínimos quadrados, que utiliza pontos anteriores e posteriores a cada trecho distorcido, associada à metodologia para detecção dos intervalos de saturação fundamentada na *Morfologia Matemática*, apresentou erro transitório máximo de 11,3513% em módulo. Esse valor ocorre devido à detecção atrasada por uma amostra do início do segundo intervalo de saturação. Entretanto, isso não prejudicou a compensação, pois os valores RMS do sinal corrigido aproximaram-se bastante dos valores ideais. Para as demais associações envolvendo essa técnica de correção, o erro transitório percentual não excedeu o módulo de 5,3%.

Mais uma vez, o pior desempenho foi obtido pela metodologia de detecção através da distância entre pontos consecutivos nos planos  $del_2 \times del_1$  e  $del_3 \times del_2$  e correção por mínimos quadrados, utilizando somente pontos anteriores a cada intervalo de saturação. O erro transitório percentual para essa compensação atingiu o valor absoluto de 32,1208%. Isso ocorreu durante a correção do segundo trecho distorcido. Os resultados dessa análise são mostrados na Figura 4.68.

Além disso, os valores RMS para o sinal corrigido aparecem na Figura 4.69, onde é possível verificar que, apesar do erro elevado durante os dois primeiros ciclos, a reconstrução da forma de onda distorcida promove boa aproximação do sinal corrigido em relação aos valores RMS ideais.

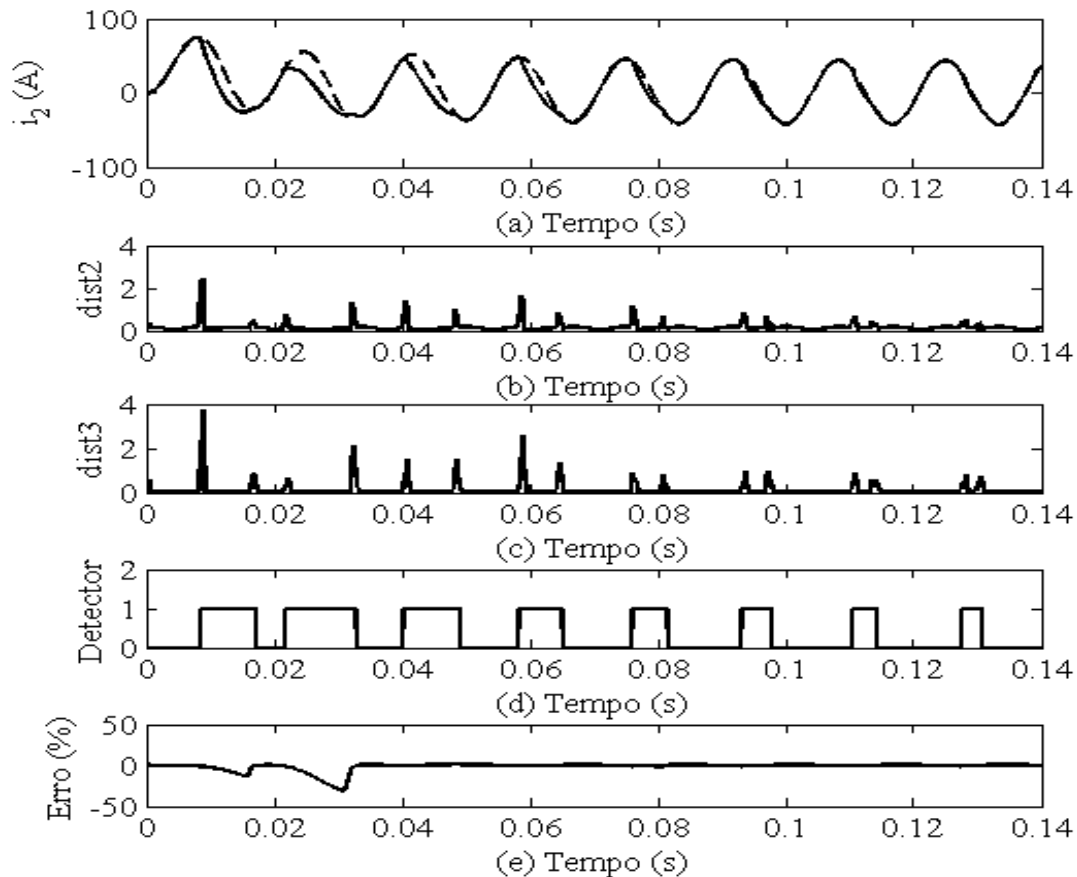


Figura 4.68 – Detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores a cada intervalo de saturação. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valores das distâncias no plano del2 x del1. (c) Valores das distâncias no plano del3 x del2. (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

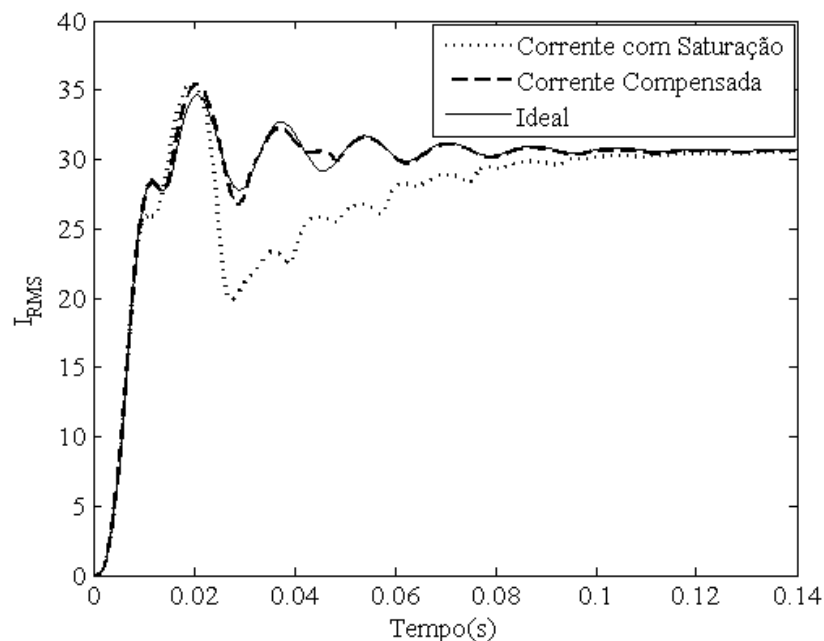


Figura 4.69 – Valores RMS para a combinação entre detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores a cada intervalo de saturação.

Para a situação envolvendo 80% de fluxo remanescente no núcleo do TC, a distorção do sinal durante o primeiro ciclo do mesmo torna-se ainda mais severa. Nenhuma observação relativa ao desempenho das metodologias de detecção foi verificada, além daquelas ocorridas para a situação que não envolvia fluxo remanescente.

Os piores resultados para compensação desse sinal foram obtidos pela metodologia proposta por PAN *et al.* (2004), que inicia a correção desde o primeiro ciclo. Tais resultados aparecem na Figura 4.70, onde é possível perceber que o erro transitório percentual da correção teve valores elevados durante a compensação do primeiro trecho distorcido. O valor absoluto máximo desse erro não excedeu 33,2653%. Os valores RMS do sinal corrigido aparecem na Figura 4.71. Para a aplicação dessa metodologia, corrigindo o sinal a partir do segundo ciclo do mesmo, o erro transitório não ultrapassou o valor de 4,52% em módulo.

As técnicas de correção por regressão e corrente de magnetização apresentaram erros transitórios máximos de 6,5682% e 12,4694%, respectivamente, durante a análise desse sinal. Para ambas as metodologias, o sinal reconstruído obteve boa aproximação em relação aos valores RMS do sinal ideal.

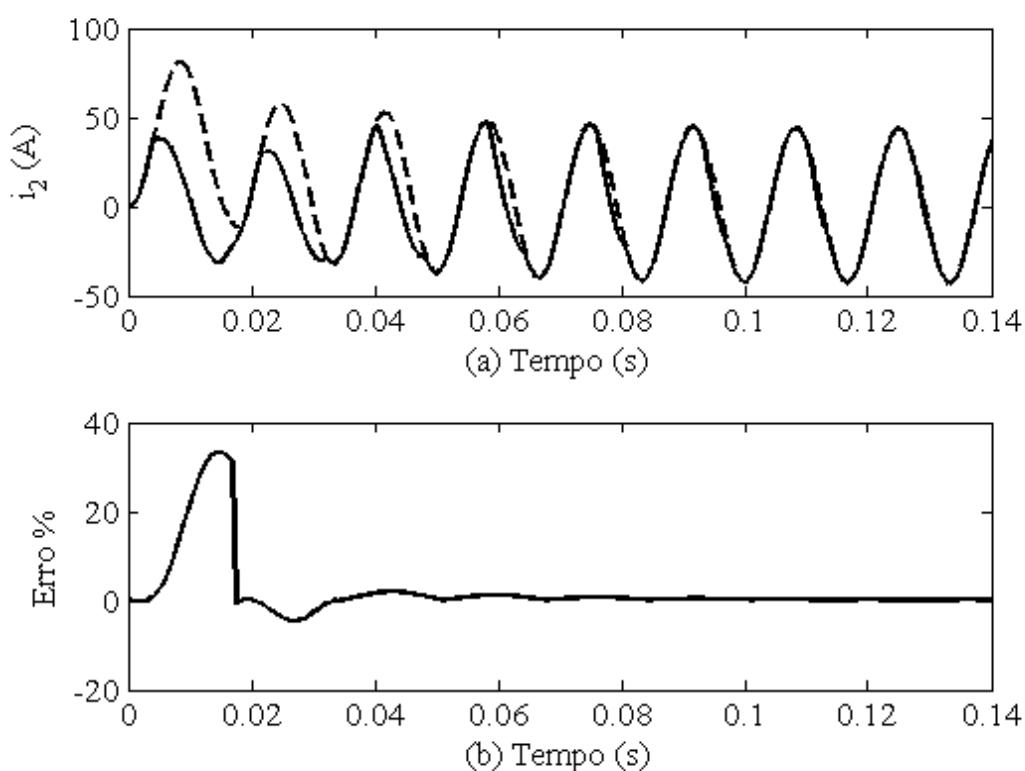


Figura 4.70 – Resultados para a correção a partir do primeiro ciclo utilizando mínimos quadrados. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Erro transitório percentual.

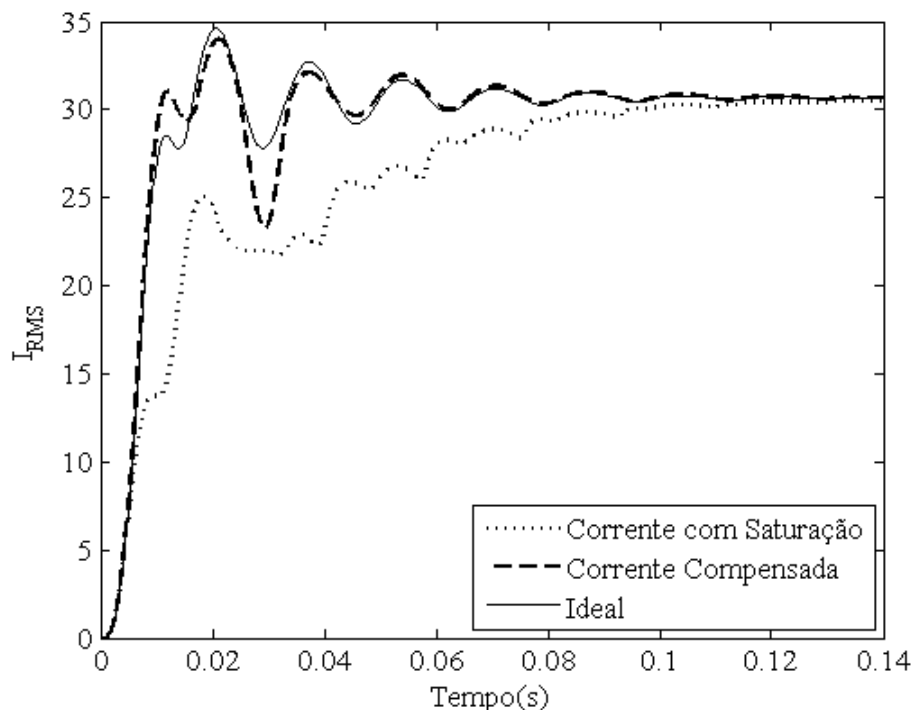


Figura 4.71 – Valores RMS para a correção a partir do primeiro ciclo utilizando mínimos quadrados.

Além disso, para as combinações envolvendo correção por mínimos quadrados, utilizando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação detectado, o erro transitório da correção foi inferior a 10% em módulo. Dentre estas, o maior erro transitório verificado foi para a associação com a técnica de detecção fundamentada na Morfologia Matemática. Para essa metodologia, o erro transitório teve valor absoluto máximo de 9,5127%. Por ter ocorrido em um ponto isolado, isso não afetou o desempenho da correção, pois os valores RMS do sinal corrigido aproximaram-se bem dos valores RMS ideais.

Também, vale destacar que o melhor desempenho para a compensação desse sinal, dentre todas as metodologias analisadas, foi obtido pela associação entre essa técnica de correção e da detecção através da distância entre pontos consecutivos nos planos  $del_2 \times del_1$  e  $del_3 \times del_2$ . O erro transitório para essa correção não ultrapassou o módulo de 3,4356% e os valores RMS do sinal corrigido aproximam-se de forma bastante satisfatória dos valores RMS ideais, conforme é mostrado nas Figuras 4.72 e 4.73, respectivamente.

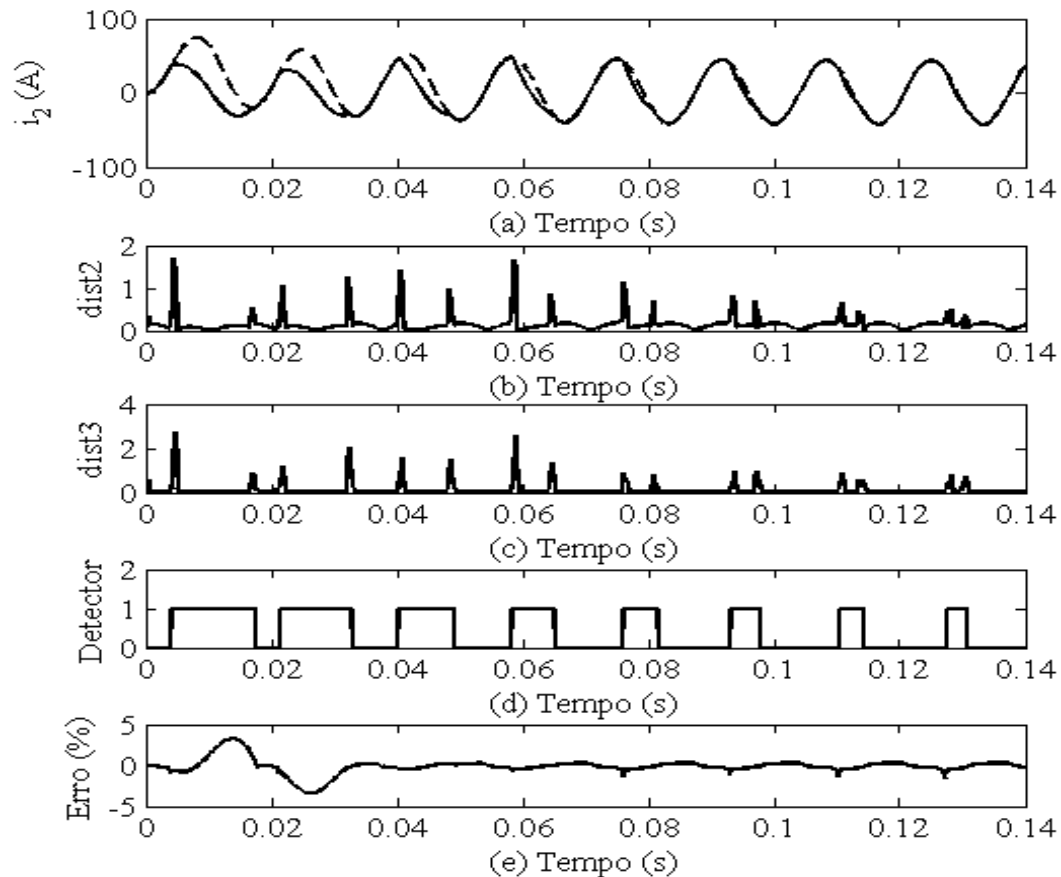


Figura 4.72 – Detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação. (a) Sinal de corrente corrigido (tracejado) e sinal de corrente distorcido por saturação. (b) Valores das distâncias no plano del2 x del1. (c) Valores das distâncias no plano del3 x del2. (d) Detector de saturação. (e) Erro transitório percentual.

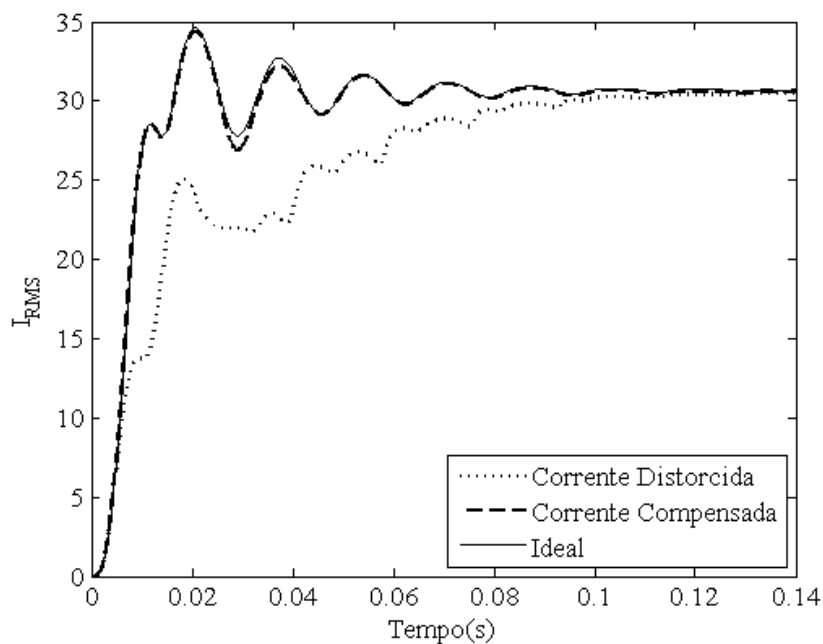


Figura 4.73 – Valores RMS para a combinação entre a detecção dos intervalos de saturação através das distâncias entre pontos consecutivos nos planos formados por amostras de corrente secundária e suas funções-diferença e correção por mínimos quadrados usando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação.

Por fim, a associação entre a técnica de correção por mínimos quadrados, utilizando somente pontos anteriores ao respectivo trecho distorcido, e a detecção pela distância entre pontos consecutivos nos planos  $del_2 \times del_1$  e  $del_3 \times del_2$ , obteve bom desempenho durante a compensação desse sinal. O erro transitório percentual para essa análise foi relativamente alto, não ultrapassando o valor máximo de 32,0952%. Isso ocorreu em um ponto isolado durante a correção do primeiro intervalo de saturação, o que não afetou significativamente a aproximação entre os valores RMS do sinal corrigido e do sinal ideal de corrente secundária.

#### 4.4 Avaliação do Tempo de Processamento das Metodologias

Uma vez que as metodologias foram testadas para uma amostragem de 96 amostras por ciclo, o intervalo entre uma amostra e outra é de aproximadamente 174 $\mu$ s. Sendo assim, o tempo demandado por todas as técnicas de detecção deve ser inferior ao referido intervalo. Ainda, para compensações que ocorrem durante os trechos de saturação, o tempo demandado para detecção e correção deve ser inferior ao intervalo entre amostras.

Nesse contexto, o tempo requerido por cada metodologia foi computado por função apropriada do Matlab<sup>®</sup> e avaliado criteriosamente.

A técnica proposta por PAN *et al.* (2004), que utiliza mínimos quadrados para compensação dos sinais distorcidos por saturação, obteve os melhores tempos de processamento. Entretanto, isso era esperado, uma vez que essa metodologia não requer a associação com uma técnica de detecção. Para determinação dos coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda$  e  $B$ , o tempo máximo demandado não ultrapassou 57  $\mu$ s. Vale ressaltar que, para cada trecho a ser corrigido do sinal, os referidos parâmetros são calculados apenas uma vez, assim que a matriz e o vetor com valores de corrente secundária envolvidos no processo são preenchidos. Também, foi verificado que o tempo para o cálculo de cada ponto do sinal corrigido não ultrapassou 6  $\mu$ s. Esses intervalos de tempo demandados são perfeitamente aceitáveis para aplicação em tempo real.

Dentre as técnicas de detecção testadas, a fundamentada na *Transformada Wavelet Discreta* obteve o pior desempenho com relação ao tempo demandado. Para uma janela de dados de oito amostras, o tempo requerido para cálculo de um nível de transformada foi de 768  $\mu$ s. Esse tempo é totalmente inviável para aplicação em tempo real com uma amostragem equivalente a 96 amostras/ciclo, visto que esse intervalo é muito maior do que os 174  $\mu$ s entre amostras consecutivas. Entretanto, o tempo demandado por essa metodologia é aceitável para

amostragens menores ou iguais a 16 amostras/ciclo (intervalo entre amostras maior do que 1 ms).

Além disso, a técnica de regressão associada a essa metodologia de detecção, apresentou bom tempo de processamento, demandando não mais do que 91  $\mu$ s para determinação dos coeficientes  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  e 7,3  $\mu$ s para o cálculo de cada ponto do sinal corrigido. Entretanto, essa técnica de correção tem um atraso equivalente ao intervalo entre o instante em que é detectado o início do respectivo trecho saturado e a determinação do ponto de referência.

A associação entre detecção através da terceira diferença do sinal e correção por corrente de magnetização obteve bom desempenho com relação ao tempo de processamento, mostrando-se eficaz para aplicação em tempo real. Para tal associação, o tempo máximo demandado não ultrapassou 61  $\mu$ s, sendo aproximadamente 20  $\mu$ s requeridos durante a detecção, 35  $\mu$ s para estimação da corrente de magnetização e 6  $\mu$ s para o cálculo de cada valor do sinal corrigido.

As metodologias de detecção associadas à técnica de correção fundamentada em mínimos quadrados, utilizando somente pontos anteriores ou anteriores e posteriores aos respectivos intervalos de saturação, obtiveram resultados satisfatórios com relação ao tempo de processamento. Dentre estas, o melhor desempenho com relação a esse critério foi verificado para a detecção por *Terceira Derivada*, demandando não mais do que 13  $\mu$ s para detecção da saturação. Já o pior desempenho foi verificado para a detecção por *Morfologia Matemática*, que demandou tempo máximo de 37  $\mu$ s. Para a técnica que analisa os ângulos formados entre as diferenças do sinal de corrente, o tempo máximo requerido para determinação dos intervalos de saturação não excedeu 20  $\mu$ s. Também, foi verificado que o tempo máximo demandado pela metodologia fundamentada na distância entre pontos consecutivos nos planos  $del_2$  x  $del_1$  e  $del_3$  x  $del_2$  não excedeu 28  $\mu$ s. Esses valores comprovam a possibilidade de aplicação em tempo real de todas essas técnicas de detecção.

Ainda, notou-se que a metodologia de correção por mínimos quadrados demanda, no máximo, cerca de 120  $\mu$ s durante a determinação dos coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda$  e  $B$ . Isso foi verificado para a aplicação envolvendo pontos antes e depois do respectivo intervalo de saturação a ser corrigido. O tempo máximo demandado para o cálculo de cada valor do sinal corrigido não excedeu 6  $\mu$ s. Vale ressaltar também que, para essa aplicação, a metodologia apresenta um atraso equivalente ao intervalo de saturação mais cinco amostras, sendo este o



tempo requerido para preenchimento da matriz e do vetor envolvidos nos cálculos dos parâmetros.

Por fim, foi verificado que, para a aplicação da técnica de correção por mínimos quadrados, utilizando somente pontos anteriores aos respectivos trechos distorcidos, o tempo máximo requerido para o cálculo dos parâmetros foi de aproximadamente 82  $\mu$ s. Esse tempo é menor do que o demandado pela metodologia envolvendo pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação, o que era esperado, pois o vetor e a matriz envolvidos na determinação dos parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda$  e  $B$  são menores para essa aplicação. Além disso, tempo demandado para cálculo de cada ponto do sinal corrigido também não excedeu 6  $\mu$ s, possibilitando a aplicação dessa metodologia em tempo real.

#### 4.5 Resumo dos Resultados

Para resumir os resultados, tabelas foram construídas, contendo os valores absolutos máximos de erro transitório percentual para cada caso analisado e tempo de processamento de cada técnica. Essas tabelas foram feitas com o objetivo de facilitar a verificação dos resultados obtidos para cada metodologia.

As Tabelas 4.1 a 4.7 mostram os valores máximos de erro transitório percentual de cada metodologia para cada caso analisado. Além disso, as Tabelas 4.8 e 4.9 mostram o tempo máximo de processamento demandado por cada técnica de detecção e correção, respectivamente.

Tabela 4.1 – Valor absoluto máximo de erro transitório para o primeiro caso

Falta Monofásica: Carga resistiva de $4\Omega$ e 0% de Fluxo Remanescente	
Metodologia	Erro Transitório Percentual Máximo (módulo)
<i>Mínimos Quadrados (segundo ciclo)</i>	5,1808 %
<i>Mínimos Quadrados (primeiro ciclo)</i>	11,5479 %
<i>Transformada Wavelet + Regressão</i>	3,1117 %
<i>Funções-Diferença + Corrente de Magnetização</i>	5,9215 %
<i>Morfologia Matemática + Mínimos Quadrados</i>	3,6409 %
<i>Ângulos + Mínimos Quadrados</i>	5,3622 %
<i>Terceira Derivada + Mínimos Quadrados</i>	9,6553 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados (pontos antes)</i>	15,1509 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados</i>	5,9131 %

Tabela 4.2 – Valor absoluto máximo de erro transitório para o segundo caso

Falta Monofásica: Carga resistiva de 4Ω e 80% de Fluxo Remanescente	
Metodologia	Erro Transitório Percentual Máximo (módulo)
<i>Mínimos Quadrados (segundo ciclo)</i>	1,6210 %
<i>Mínimos Quadrados (primeiro ciclo)</i>	6,0582 %
<i>Transformada Wavelet + Regressão</i>	3,1123 %
<i>Funções-Diferença + Corrente de Magnetização</i>	15,6041 %
<i>Morfologia Matemática + Mínimos Quadrados</i>	7,0608 %
<i>Ângulos + Mínimos Quadrados</i>	5,4086 %
<i>Terceira Derivada + Mínimos Quadrados</i>	9,8199 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados (pontos antes)</i>	43,0486 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados</i>	7,3251 %

Tabela 4.3 – Valor absoluto máximo de erro transitório para o terceiro caso

Falta Monofásica: Carga de 4Ω, 80% de Fluxo Remanescente, Fator de potência indutivo da Carga do TC	
Metodologia	Erro Transitório Percentual Máximo (módulo)
<i>Mínimos Quadrados (segundo ciclo)</i>	8,2140 %
<i>Mínimos Quadrados (primeiro ciclo)</i>	21,6400 %
<i>Transformada Wavelet + Regressão</i>	3,3944 %
<i>Funções-Diferença + Corrente de Magnetização</i>	12,7834 %
<i>Morfologia Matemática + Mínimos Quadrados</i>	16,6184 %
<i>Ângulos + Mínimos Quadrados</i>	27,3051 %
<i>Terceira Derivada + Mínimos Quadrados</i>	11,6202 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados (pontos antes)</i>	75,7363 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados</i>	8,1199 %

Tabela 4.4 – Valor absoluto máximo de erro transitório para o quarto caso

Falta Monofásica: Carga resistiva de 10Ω e 0% de Fluxo Remanescente	
Metodologia	Erro Transitório Percentual Máximo (módulo)
<i>Mínimos Quadrados (segundo ciclo)</i>	5,9043 %
<i>Mínimos Quadrados (primeiro ciclo)</i>	18,1725 %
<i>Transformada Wavelet + Regressão</i>	3,2425 %
<i>Funções-Diferença + Corrente de Magnetização</i>	8,3024 %
<i>Morfologia Matemática + Mínimos Quadrados</i>	5,2478 %
<i>Ângulos + Mínimos Quadrados</i>	6,2303 %
<i>Terceira Derivada + Mínimos Quadrados</i>	14,1974 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados (pontos antes)</i>	22,4908 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados</i>	5,3853 %

Tabela 4.5 – Valor absoluto máximo de erro transitório para o quinto caso

Falta Monofásica: Carga resistiva de 10Ω e 80% de Fluxo Remanescente	
Metodologia	Erro Transitório Percentual Máximo (módulo)
<i>Mínimos Quadrados (segundo ciclo)</i>	5,8977 %
<i>Mínimos Quadrados (primeiro ciclo)</i>	73,3035 %
<i>Transformada Wavelet + Regressão</i>	3,2426 %
<i>Funções-Diferença + Corrente de Magnetização</i>	11,1209 %
<i>Morfologia Matemática + Mínimos Quadrados</i>	14,4797 %
<i>Ângulos + Mínimos Quadrados</i>	6,2303 %
<i>Terceira Derivada + Mínimos Quadrados</i>	14,1977 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados (pontos antes)</i>	100,1412 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados</i>	5,3854 %

Tabela 4.6 – Valor absoluto máximo de erro transitório para o sexto caso

Falta Trifásica: Carga resistiva de 4Ω e 0% de Fluxo Remanescente	
Metodologia	Erro Transitório Percentual Máximo (módulo)
<i>Mínimos Quadrados (segundo ciclo)</i>	2,0384 %
<i>Mínimos Quadrados (primeiro ciclo)</i>	12,1169 %
<i>Transformada Wavelet + Regressão</i>	3,9145 %
<i>Funções-Diferença + Corrente de Magnetização</i>	5,3689 %
<i>Morfologia Matemática + Mínimos Quadrados</i>	11,3513 %
<i>Ângulos + Mínimos Quadrados</i>	3,0628 %
<i>Terceira Derivada + Mínimos Quadrados</i>	5,2140 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados (pontos antes)</i>	32,1208 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados</i>	3,2233 %

Tabela 4.7 – Valor absoluto máximo de erro transitório para o sétimo caso

Falta Trifásica: Carga resistiva de 4Ω e 80% de Fluxo Remanescente	
Metodologia	Erro Transitório Percentual Máximo (módulo)
<i>Mínimos Quadrados (segundo ciclo)</i>	4,5151 %
<i>Mínimos Quadrados (primeiro ciclo)</i>	33,2653 %
<i>Transformada Wavelet + Regressão</i>	6,5686 %
<i>Funções-Diferença + Corrente de Magnetização</i>	12,4694 %
<i>Morfologia Matemática + Mínimos Quadrados</i>	9,5127 %
<i>Ângulos + Mínimos Quadrados</i>	4,5353 %
<i>Terceira Derivada + Mínimos Quadrados</i>	6,4992%
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados (pontos antes)</i>	32,0952 %
<i>Distância nos Planos + Mínimos Quadrados</i>	3,4356 %

Tabela 4.8 – Tempo máximo demandado por cada técnica de detecção

Técnica de Detecção	Tempo Máximo de Processamento (aproximado)
<i>Transformada Wavelet Discreta</i>	768 $\mu$ s
<i>Terceira Função-Diferença</i>	20 $\mu$ s
<i>Morfologia Matemática</i>	37 $\mu$ s
<i>Ângulos</i>	20 $\mu$ s
<i>Terceira Derivada</i>	13 $\mu$ s
<i>Distância entre Pontos nos Planos del2 x del1 e del3 x del2</i>	28 $\mu$ s

Tabela 4.9 – Tempo máximo demandado por cada técnica de correção

Técnica de Correção	Tempo de Processamento (aproximado)	
	Estimação de Parâmetros	Cálculo de Cada Ponto do Sinal Corrigido
<i>Mínimos Quadrados (utilizando dois trechos não saturados anteriores e consecutivos a cada trecho distorcido)</i>	57 $\mu$ s	6 $\mu$ s
<i>Técnica de Regressão</i>	91 $\mu$ s	7,3 $\mu$ s
<i>Corrente de Magnetização</i>	35 $\mu$ s	6 $\mu$ s
<i>Mínimos Quadrados (utilizando pontos anteriores a cada trecho distorcido)</i>	82 $\mu$ s	6 $\mu$ s
<i>Mínimos Quadrados (utilizando pontos anteriores e posteriores a cada trecho distorcido)</i>	120 $\mu$ s	6 $\mu$ s

## 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 metodologias de detecção, verificou-se que todas as técnicas mostraram-se viáveis para aplicação em tempo real. A única exceção foi a técnica de detecção fundamentada na *Transformada Wavelet Discreta*, que demanda um tempo maior do que o intervalo entre amostras para realizar a detecção dos intervalos de saturação, considerando uma amostragem de 96 amostras/ciclo. Entretanto, o tempo demandado por essa metodologia é viável para aplicação em tempo real, utilizando taxas de amostragem menores ou iguais a 16 amostras/ciclo.

Além disso, a precisão das metodologias de detecção variou para cada caso analisado. As técnicas fundamentadas nas funções-diferença do sinal e nas distâncias entre pontos consecutivos nos planos  $\Delta x$  e  $\Delta y$  e  $\Delta z$  podem não detectar os finais de alguns intervalos de curta duração, ou até não detectar esses intervalos, onde a distorção presente no sinal não apresenta variações bruscas. A metodologia fundamentada nos ângulos entre as diferenças do sinal apresentou pior desempenho para a detecção dos finais de intervalos desse tipo.

Técnicas de detecção que estimam pontos futuros e fazem posterior comparação com valores do sinal amostrado, como as fundamentadas em *Morfologia Matemática e Terceira Derivada*, apresentaram atrasos na detecção de alguns intervalos de saturação e até a antecipação dos finais dos mesmos.

Obviamente, o desempenho das metodologias de correção é extremamente dependente da precisão dos detectores aos quais foram associadas. A técnica de regressão apresentou os menores erros transitórios percentuais para a compensação da maioria dos casos testados. Contudo, apresenta um atraso considerável.

A compensação por corrente de magnetização obteve bons resultados para a correção dos sinais gerados em simulações envolvendo cargas puramente resistivas no secundário do TC. Erros transitórios mais elevados foram verificados quando uma carga com fator de potência indutivo era acoplada ao secundário do TC, o que era esperado, uma vez que a proposta original considera a carga do transformador de corrente sendo puramente resistiva. Bons resultados com relação ao tempo de processamento foram verificados, permitindo a aplicação dessa técnica em tempo real. Entretanto, essa metodologia apresenta como desvantagem a necessidade de conhecimento da característica de excitação do transformador de corrente.

As metodologias para compensação por mínimos quadrados mostraram-se dependentes do número de pontos envolvidos na determinação dos parâmetros característicos do sinal. A aplicação utilizando somente pontos anteriores obteve bons resultados, mostrando-se viável para aplicação em tempo real. Entretanto, maior o erro transitório da correção quanto maior a severidade e duração dos intervalos de saturação. Para a aplicação utilizando pontos anteriores e posteriores a cada trecho distorcido, o erro transitório foi menor, garantindo boa qualidade à correção. Contudo, essa aplicação apresenta atraso equivalente ao intervalo de saturação mais cinco amostras.

Por fim, a metodologia proposta por PAN *et al.* (2004), também fundamentada em mínimos quadrados, apresentou excelentes resultados sem a necessidade de um detector de saturação. Para a aplicação iniciando a correção do sinal a partir do segundo ciclo, erros transitórios baixos foram verificados. Entretanto, essa metodologia promoverá atraso de pelo menos um ciclo na operação do relé. A outra aplicação, iniciando a correção a partir do primeiro ciclo, também apresentou excelentes resultados, mesmo tendo erros transitórios elevados durante a correção do primeiro trecho saturado. Além disso, o tempo de processamento demandado por ambas as aplicações confirma a viabilidade de implementação dessas metodologias em tempo real.

## Capítulo 5

# CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho abordou assuntos relacionados com a saturação dos transformadores de corrente: causas, conseqüências e fundamentos, bem como os principais problemas relacionados ao assunto.

Alguns métodos para detecção e correção dos efeitos da saturação foram apresentados de forma a facilitar o entendimento e a aplicação das diversas técnicas analisadas. Além disso, novas metodologias de detecção foram propostas.

Nesse trabalho, os métodos utilizados para identificar os intervalos de saturação foram avaliados de forma a se verificar os desempenhos em termos da capacidade de detecção e tempo de resposta. Também, os métodos utilizados para corrigir os sinais distorcidos em virtude da saturação foram avaliados em termos da precisão da compensação e tempo de resposta.

Os métodos foram testados para diversos sinais de corrente gerados por meio de simulação computacional. Esses sinais foram obtidos por meio de simulação de curtos-circuitos, envolvendo diferentes níveis de fluxo remanescente no núcleo do TC e variações de carga secundária.

Com relação às técnicas de detecção, destaca-se o desempenho da proposta fundamentada no cálculo da distância entre pontos consecutivos nos planos del2 x del1 e del3 x del2, que, embora não encontre alguns finais dos trechos distorcidos, obteve maior precisão na detecção dos intervalos de saturação. A menor precisão foi verificada para a técnica fundamentada na *Terceira Derivada*, que apresentou mais atrasos na detecção dos inícios e antecipações na detecção dos finais dos trechos distorcidos por saturação.

Como o desempenho das técnicas de correção é dependente da precisão dos detectores, as metodologias de correção apresentaram comportamentos variados com relação ao erro transitório percentual da compensação. Contudo, verificou-se que metodologias fundamentadas em Mínimos Quadrados, que utilizam pontos anteriores e posteriores a cada

intervalo de saturação, apresentam erros transitórios relativamente baixos durante a compensação, garantindo grande melhora a qualidade dos sinais distorcidos. Isso foi verificado tanto para a aplicação dessa metodologia sem a necessidade de detectores de saturação, quanto para a associação com tais detectores.

Sendo assim, vale destacar o bom desempenho do método de correção por Mínimos Quadrados, utilizando pontos anteriores e posteriores a cada intervalo de saturação, quando associado à metodologia de detecção proposta fundamentada no cálculo da distância entre pontos consecutivos nos planos  $del_2 \times del_1$  e  $del_3 \times del_2$ . Essa associação apresentou erros transitórios relativamente baixos para todos os casos analisados.

## **5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos**

Com relação aos métodos de detecção e correção dos efeitos da saturação dos transformadores de corrente, sugere-se:

- Desenvolver metodologias de ajuste adaptativo para as propostas de detecção da saturação;
- Avaliar o desempenho das metodologias propostas a partir da implementação em hardware;
- Avaliar o desempenho das metodologias em campo.



# BIBLIOGRAFIA

ALSTOM, **Network Protection & Automation Guide**. Levallois-Perret, France, 2002.

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

BRIDGER, B. & BURSE, T. A., **Operation of Ground Sensor Relays Under Conditions of Partial CT Saturation**. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 33, n° 4, pp. 1111-1116, Julho/Agosto 1997.

BS 3938-1973. **Specification for Current Transformer**.

BURRUS, C. S.; GOPINATH, R. A. & GUO, H., **Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1998.

CAMARENA, J. A. A., **Modelado y Simulación de Transformadores de Corriente con el Programa EMTP/ATP**. IEEE Latin America Transactions. Vol. 2, n° 3, pp. 201-205, Setembro 2004.

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

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

DASHTI, H.; PASAND, M. S. & DAVARPANAH, M., **Current Transformer Saturation Detectors for Busbar Differential Protection**. Proceedings of the 42<sup>nd</sup> International Universities Power Engineering Conference, pp. 338-343, Brighton, UK, Setembro 2007

EL-AMIN, I. M. & AL-ABBAS, N. H., **Saturation of Current Transformers and its Impact on Digital Overcurrent Relays**. Proceedings of the IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, pp. 1-6, Caracas, Venezuela, Agosto 2006.

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

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

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

HOSEMANN, G. & STEIGERWALD, H. M., **Modal Saturation Detector for Digital Differential Protection**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 8, n° 3, pp. 993-940, Julho 1993.

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

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

KANG, Y. C.; LIM, U. J.; KANG, S. H. & CROSSLEY, P. A., **Compensation of the Distortion in the Secondary Current Caused by Saturation and Remanence in a CT**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 19, n° 4, pp. 1642-1649, Outubro 2004b.

KANG, Y. C.; OK, S. H. & KANG, S. H., **A Novel CT Saturation Detecting Algorithm Unaffected by a Remanent Flux**. Proceedings of the 2001 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 3, pp. 1324-1327, Vancouver, BC, Canada, Julho 2001.

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, n° 1, pp. 27-35, Janeiro 2004a.

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

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

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

KINDERMANN, G., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Editora da UFSC, Volume 1, 1<sup>a</sup> Edição, 1999.

KOJOVIC, Lj. A., **Impact of Current Transformer Saturation on Overcurrent Protection Operation**. Proceedings of the 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 3, pp. 1078-1083, Chicago, IL, USA, Julho 2002.

LEPRETTRE, B. & BASTARD, P., **Compensation of Saturation Effects in Current Transformers Using Neural Networks**. Proceedings of the International Symposium on Signal Processing and its Applications, pp. 442-445, Kuala Lumpur, Malaysia, Agosto 2001.

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

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

MASSON, L., **Circuit for the Dynamic Control of Magnetic Flux in Current Transformers**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. 98, n° 6, pp. 1990-1995, Novembro/Dezembro 1979.

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

MOONEY, P. E. J., **Distance Element Performance Under Conditions of CT Saturation**. Proceedings of the 61<sup>st</sup> Annual Conference for Protective Relay Engineers, Vol. 1, pp. 491-497, College Station, TX, USA, Abril 2008.

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

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

PASCUAL, H. O. & RAPALLINI, J. A., **Behaviour of Fourier, Cosine and Sine Filtering Algorithms for Distance Protection, Under Severe Saturation of the Current Magnetic Transformer**. Proceedings of the 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, Setembro de 2001.

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

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

REBIZANT, W.; FESER, K.; HAYDER, T. & SCHIEL, L., **Differential Relay with Adaptation During Saturation Period of Current Transformers**. Proceedings of the 14<sup>th</sup> Power System Protection Conference, pp. 124-129, Bled, Slovenia, Setembro/Outubro 2004.

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

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

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

SANTOS, E. M. dos; FARIAS, P. E.; CARDOSO JUNIOR, G. *et al.*, **Detecção do Intervalo de Saturação de Transformadores de Corrente Através do Ângulo entre as Diferenças das Amostras de Corrente Secundária**. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito-MS, Brasil, Setembro 2010a.

SANTOS, E. M. dos; FARIAS, P. E.; CARDOSO JUNIOR, G. *et al.*, **Compensação dos Efeitos Causados pela Saturação dos Transformadores de Corrente por Meio da Utilização de Parâmetros de Curvas e Terceira Derivada**. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, São Paulo-SP, Brasil, Novembro 2010b.

SAWKO, P., **Impact of Secondary Burden and X/R Ratio on CT Saturation**. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference IEEEIC 2008, pp. 75-76, Cottbus, Germany, Maio 2001.

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

SHI, D. Y.; BUSE, J.; WU, Q. H. & JIANG, L., **Fast Compensation of Current Transformer Saturation**. Proceedings of the 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), pp. 1-7, Gothenburg, Sweden, Outubro 2010.

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.

STRINGER N. T., **The Effect of DC Offset on Current Operated Relays**. Proceedings of The IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, Philadelphia, PA, USA, Maio 1997.

TZIOUVARAS, D. A.; MCLAREN, P.; ALEXANDER, G. *et al.*, **Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 15, n° 15, pp. 62-72, Janeiro 2000.

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

VILLAMAGNA, N. & CROSSLEY, P. A., **A CT Saturation Detection Algorithm Using Symmetrical Components for Current Differential Protection**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 21, n° 1, pp. 38-45, Janeiro 2006.

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

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

WU, D.; YIN X.; ZHANG, Z. & ZHANG, K., **Research on Transmission Lines Multi Current Differential Relay Scheme**. Proceedings of the 42<sup>nd</sup> International Universities Power Engineering Conference, pp. 300-304, Brighton, UK, Setembro 2007.

WU, Q. H.; LU, Z. & JI, T. Y., **Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology**. Springer, London, UK, 2009.

YANG, L.; DOLLOFF, P. A. & PHADKE, A. G., **A Microprocessor Based Bus Relay Using a Current Transformer Saturation Detector**. Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Annual North American Power Symposium, pp. 193-202, Auburn, AL, USA, Outubro 1990.

YU, C. S., **Detection and Correction of Saturated Current Transformer Measurements Using Decaying DC Components**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 25, n° 3, pp. 1340-1347, Julho 2010.

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, Calgary, AB, Canada, Julho 2009.

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

YU, D. C.; CUMMINS, J. C.; WANG, Z.; YOON, H. J. & KOJOVIC, Lj. A., **Correction of Current Transformer Distorted Secondary Due to Saturation Using Artificial Neural Networks**. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 16, n° 2, pp. 189-194, Abril 2001.

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

ZOCHOLL, S. E. & BENMOUYAL, G., **How Microprocessor Relays Respond to Harmonics, Saturation, and Other Wave Distortions**. Proceedings of the 24<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, USA, Outubro 1997.

ZOCHOLL, S. E. & SMAHA, D. W., **Current Transformer Concepts**. Proceedings of the 46<sup>th</sup> Annual Georgia Tech Protective Relay Conference, Atlanta, GA, USA, Abril/Maio 1992.

ZOCHOLL, S. E., **Análise e Aplicação de Transformadores de Corrente**. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. 2004.

