

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE DA RESPOSTA TRANSITÓRIA DE**  
**TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE PROTEÇÃO E**  
**O IMPACTO EM RELÉS DE SOBRECORRENTE**  
**NUMÉRICOS**

**AURÉLIO LUIZ MAGALHÃES COELHO**

**Outubro de 2011**  
**Itajubá - MG**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AURÉLIO LUIZ MAGALHÃES COELHO**

**ANÁLISE DA RESPOSTA TRANSITÓRIA DE  
TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE PROTEÇÃO E  
O IMPACTO EM RELÉS DE SOBRECORRENTE  
NUMÉRICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração:** Sistemas Elétricos de Potência

**Orientador:** Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira

**Outubro de 2011  
Itajubá – MG**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

C672a

Coelho, Aurélio Luiz Magalhães

Análise da resposta transitória de transformadores de corrente de proteção e o impacto em relés de sobrecorrente numéricos / Aurélio Luiz Magalhães Coelho. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2011.

118 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira.

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior.

Dissertação(Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Transformador de corrente. 2. Saturação. 3. Análise de transi\_  
tórios. 4. Simulador digital em tempo real. 5. Proteção de sobrecor\_  
rente. I. Silveira, Paulo Márcio da, orient. II. Belchior, Fernando  
Nunes, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.



Ministério da Educação  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

## A N E X O II

### FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da **“Análise da Resposta Transitória de**  
Dissertação: **Transformadores de Corrente de Proteção e o**  
**Impacto em Relés de Sobrecorrente Numéricos”**

Autor: **Aurélio Luiz Magalhães Coelho**

### JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente	
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

**Observações:**

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
  - (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
  - (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.
- Este documento terá a validade de 60 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A, ou seja, Aprovado

Observações: \_\_\_\_\_

Itajubá, 03 de Outubro de 2011.

Prof. Dr. Carlos Augusto Duque  
1º Examinador – UFJF

Prof. Dr. Pedro Paulo de Carvalho Mendes  
2º Examinador – UNIFEI

Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior  
3º Examinador (Co-Orientador) - UNIFEI

Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira  
4º Examinador (Orientador) - UNIFEI

## DEDICO ESTE TRABALHO

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais Luiz Coelho Júnior e Maria de Fátima G. M. Coelho a quem devo todas as minhas vitórias na vida.

# Agradecimentos

A Deus, por me conceder fé e perseverança durante esta caminhada.

Aos meus pais Luiz Coelho Júnior e Maria de Fátima G. M. Coelho pela educação, carinho, afeto e apoio que sempre me proporcionaram.

Aos meus irmãos André e Aline pelos conselhos e amizade ao longo de toda a vida.

Aos meus avôs Odílio e Luiz Coelho (*in memoriam*), e as minhas avós Zita (*in memoriam*) e Helosine, pois é preciso amparo e inspiração para viver.

A minha namorada, Karla Karoline, pelas palavras de incentivo, pelo carinho, compreensão e companheirismo mesmo com a distância.

Ao professor Dr. Paulo Márcio da Silveira por todas as oportunidades e facilidades, pela orientação segura e fecunda.

Ao professor Dr. Fernando Belchior pela co-orientação e facilidades de trabalho dentro do grupo GQEE.

Aos colegas e professores da UNIFEI e UFMA que, durante esta caminhada, tornaram o dia a dia mais agradável para o trabalho.

A Carlos Villegas, pela parceria nos trabalhos realizados e pela disponibilidade nos momentos de dúvidas.

Aos meus amigos Denisson Queiroz e Marcus Sollyvan pela companhia, amizade e conselhos na temporada em que dividimos o mesmo lar.

Ao meu grande amigo e conterrâneo Renan, pelas honrosas visitas, por compartilhar dos mesmos sonhos e pelos incentivos para continuar na luta por um lugar ao sol.

A CAPES e ao GQEE pelo apoio financeiro.

À FAPEMIG, sem a qual não seria possível a aquisição do RTDS.

Por fim, a todos aqueles que de forma direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão dessa dissertação.

*"A mente que se abre a uma nova  
idéia jamais voltará a seu tamanho  
original."*

Albert Einstein

# Resumo

Esta dissertação discute o problema da saturação de transformadores de corrente (TCs) no desempenho de relés de proteção. A saturação pode ser causada pela utilização de um *burden* acima do valor padrão, pelo aumento nos níveis de curto-circuito, pela presença de componentes assimétricas (*offset DC*) na corrente de falta e pelo fluxo remanescente. Com a saturação, a corrente primária do TC não é totalmente refletida no seu secundário e, dependendo da severidade da saturação, a corrente vista pelo relé poderá ser consideravelmente reduzida e distorcida em relação à ideal, podendo o relé não operar no tempo desejado. Diante disso, são apresentadas neste trabalho duas metodologias para analisar os efeitos da saturação do TC na resposta de um relé numérico comercial. No primeiro método, um modelo de TC é implementado matematicamente em MATLAB. Os dados dos sinais secundários do TC, obtidos da simulação, são convertidos para o formato COMTRADE e carregados em um equipamento de injeção de corrente para avaliar o desempenho da proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada de um relé. No segundo método, uma análise similar é realizada utilizando-se o *Real Time Digital Simulator* (RTDS). Neste caso, um modelo de TC próprio da biblioteca do RSCAD (*software* do RTDS) é utilizado e seus sinais primários de entrada são obtidos a partir da corrente resultante de um sistema de distribuição modelado no próprio RTDS. Este TC será configurado com os mesmos parâmetros nominais e os mesmos fatores de influência na saturação do modelo implementado em MATLAB. Diferentemente do primeiro método, os testes para analisar as funções de proteção de sobrecorrente serão realizados através de simulação *Hardware-In-The-Loop* (HIL), a fim de comparar os resultados e validar os testes. A avaliação destes testes será baseada nas normas existentes e nos resultados das simulações.

**Palavras-chave:** Transformador de Corrente; Saturação; Análise de Transitórios; Simulador Digital em Tempo Real; Proteção de Sobrecorrente.



# Abstract

This work discusses the problem of current transformers (CTs) saturation on performance of numerical overcurrent relays. CT saturation can be caused by the use of a burden above its default value, by high levels of short circuit, by the presence of asymmetrical components (DC offset) in the fault current and by the remanent flux. With saturation, the CT primary current is not fully reflected in their secondary side and, depending on the saturation degree, the current seen by the relay can be considerably reduced and distorted in relation to the ideal secondary signal. So, the relay cannot operate in the desired time. Therefore, in this work are presented two methodologies to analyze the CT saturation effects on a commercial numerical relay response. In the first method, a mathematical CT model is implemented in MATLAB. CT secondary signals data, obtained from the simulation, are converted to COMTRADE format and loaded into an injection test equipment to evaluate the instantaneous and time overcurrent functions of a relay. In the second method, a similar analysis is performed using the Real Time Digital Simulator (RTDS). In this case, a CT model of the RSCAD library (RTDS software) is used and their CT primary input signals are obtained from the current resulting from a distribution system modeled in the RTDS. This CT will be configured with the same nominal parameters and the same influencing factors on CT saturation of the model implemented in MATLAB. Differently of the first method, the tests to analyze the overcurrent functions will be performed through of Hardware-in-the-Loop (HIL) simulation in order to compare results and validate the tests. The evaluation of these tests will be based on existing standards and the simulation results.

**Keywords:** Current Transformer; Saturation; Transient Analysis; Real Time Digital Simulator; Overcurrent Protection.

# Conteúdo

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>iv</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>vi</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Lista de Abreviaturas, Siglas e Unidades</b> .....	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Considerações Iniciais .....	2
1.2 Levantamento Histórico.....	2
1.3 Motivação e Objetivos .....	6
1.4 Organização da Dissertação .....	7
<b>2 Fundamentos dos Transformadores de Corrente</b> .....	<b>9</b>
2.1 Considerações Iniciais .....	10
2.2 Transformadores de Corrente .....	10
2.2.1 Principais Características de um TC de Proteção.....	12
2.2.1.1 Corrente Nominal e Relação de Transformação .....	12
2.2.1.2 Classe de Exatidão .....	13
2.2.1.3 Fator de Sobrecorrente (FS) .....	14
2.2.1.4 Corrente Nominal e Relação de Transformação .....	14
2.2.1.5 Carga Nominal ( <i>burden</i> ) .....	14
2.2.1.6 Impedância Secundária na proteção.....	15
2.2.1.7 Especificação final da Carga e Classe de Exatidão .....	16
2.2.2 Modelagem do TC.....	16
2.2.3 Saturação do TC.....	18
2.2.3.1 Fatores de influência na saturação .....	21
2.2.3.2 Critérios para evitar a saturação de TCs.....	31

2.3	Considerações Finais .....	34
<b>3</b>	<b>O RTDS e a Proteção de Sobrecorrente .....</b>	<b>35</b>
3.1	Considerações Iniciais .....	36
3.2	<i>Real Time Digital Simulator(RTDS)</i> .....	36
3.2.1	<i>Hardware</i> .....	37
3.2.2	<i>Software</i> .....	38
3.2.3	Modelos dos componentes básicos de um SEP .....	43
3.2.4	Aplicações na Área de Proteção de um SEP.....	46
3.3	Proteção de Sobrecorrente .....	47
3.4	Considerações Finais .....	50
<b>4</b>	<b>O Modelo <i>IEEE PSRC</i> implementado em MATLAB .....</b>	<b>51</b>
4.1	Considerações Iniciais .....	52
4.2	O Modelo de TC <i>IEEE PSRC</i> .....	52
4.2.1	Circuito equivalente do modelo .....	53
4.2.2	Modelagem implementada.....	55
4.2.3	Dados de entrada e resultados .....	60
4.3	Considerações Finais .....	63
<b>5</b>	<b>Sistemas de Testes .....</b>	<b>64</b>
5.1	Considerações Iniciais .....	65
5.2	Arquitetura do sistema de teste utilizando os dados COMTRADE .....	66
5.3	Sistema de testes de relés baseado em simulação HIL pelo RTDS.....	68
5.3.1	O sistema de distribuição analisado no RTDS.....	69
5.3.2	Arquitetura do sistema de testes baseado em simulação HIL.....	72
5.4	Considerações Finais .....	73
<b>6</b>	<b>Resultados e Discussões.....</b>	<b>74</b>
6.1	Considerações Iniciais .....	75

6.2	Efeitos da falta simétrica e do <i>burden</i> na resposta da proteção de sobrecorrente .....	76
6.2.1	Avaliação da proteção de sobrecorrente instantânea.....	80
6.2.2	Avaliação da proteção de sobrecorrente temporizada inversa .....	81
6.3	Efeitos da falta assimétrica e da relação X/R na resposta da proteção de sobrecorrente .....	84
6.3.1	Avaliação da proteção de sobrecorrente instantânea.....	89
6.3.2	Avaliação da proteção de sobrecorrente temporizada inversa .....	91
6.4	Efeitos da remanência na resposta da proteção de sobrecorrente .....	92
6.4.1	Avaliação da proteção de sobrecorrente .....	94
6.5.	Considerações Finais .....	95
<b>7</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>97</b>
7.1	Conclusões .....	98
7.2	Propostas para trabalhos futuros .....	99
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>101</b>
	<b>Apêndice .....</b>	<b>106</b>
Apêndice A	Sinais secundários resultantes do TC do RTDS para os casos analisados no capítulo 6 (considerando os efeitos da assimetria).....	107
Apêndice B	Sinais secundários resultantes do TC do RTDS para os casos analisados no capítulo 6 (considerando o efeito do fluxo remanescente) .....	111
Apêndice C	Trabalho aceito para publicação na conferência APAP 2011 ( <i>International Conference on Advanced Power System Automation and Protection</i> ).....	112

# Lista de Figuras

Figura 2.1:	(a) Constituição básica de um TC com a disposição dos seus enrolamentos e (b) Conexão do TC aos dispositivos de proteção .....	11
Figura 2.2:	Circuito magnético de um TC .....	13
Figura 2.3:	Modelo do circuito equivalente do TC .....	17
Figura 2.4:	Curvas de excitação de TCs classe C com variadas relações de transformação.....	19
Figura 2.5:	Curva de saturação típica de um TC e seus pontos principais .....	20
Figura 2.6:	Corrente de curto-circuito totalmente assimétrica para diferentes valores de X/R .....	22
Figura 2.7:	Circuito RL com excitação senoidal para análise da corrente de curto-circuito.....	23
Figura 2.8:	Circuito equivalente de um TC sem perdas e com carga resistiva para avaliação da evolução do fluxo no núcleo do TC .....	25
Figura 2.9:	Evolução do fluxo para $T_2 = 0,063$ e $T_1 = 0,053$ ( $X/R=20$ ) .....	27
Figura 2.10:	Evolução do fluxo para $T_2 = 0,063$ e $T_1 = 0,013$ ( $X/R=5$ ) .....	27
Figura 2.11:	Resposta da corrente secundária em condições ideais e considerando a saturação: (a) corrente de falta simétrica e (b) mesma corrente de falta, porém com assimetria e relação $X/R = 20$ .....	28
Figura 2.12:	Resposta da corrente secundária em condições ideais e considerando a saturação: (a) <i>burden</i> padrão e (b) <i>burden</i> de cinco vezes o valor padrão .....	30
Figura 3.1:	Algumas aplicações do RTDS .....	37
Figura 3.2:	RTDS da Universidade Federal de Itajubá utilizado neste trabalho	38
Figura 3.3:	Tela inicial do <i>software</i> RSCAD.....	39
Figura 3.4:	Tela inicial do módulo <i>Draft</i> e biblioteca ( <i>Library</i> ).....	41
Figura 3.5:	Exemplo de tela inicial do módulo <i>RunTime</i> .....	42
Figura 3.6:	Modelo de fonte do RSCAD (Bloco <i>Source</i> ).....	43
Figura 3.7:	Modelo de Linha de Transmissão no RSCAD (Blocos <i>T-Line Model</i> e <i>Line Calculation Block</i> ).....	44
Figura 3.8:	Bloco <i>PI Section</i> .....	44
Figura 3.9:	Blocos <i>LG Fault Point</i> e <i>L-L Fault Point</i> .....	45

Figura 3.10:	Bloco que representa os disjuntores no RSCAD ( <i>3 Phase Breaker</i> )	45
Figura 3.11:	Bloco de um TC no RSCAD e seu respectivo circuito equivalente.	46
Figura 3.12:	Curvas características do relé de sobrecorrente de tempo inverso...	48
Figura 3.13:	Coordenação entre as proteções instantânea e temporizada .....	50
Figura 4.1:	Circuito equivalente do modelo de TC <i>IEEE PSRC</i> .....	53
Figura 4.2:	Curva de excitação do modelo de TC <i>IEEE PSRC</i> .....	55
Figura 4.3:	Curva fluxo <i>versus</i> corrente de excitação usada no modelo .....	56
Figura 4.4:	Determinação do fluxo remanescente do modelo de TC proposto pelo <i>IEEE PSRC</i> .....	60
Figura 4.5:	Sinais resultantes do algoritmo implementado em MATLAB: casos com assimetria e <i>burden</i> elevados .....	61
Figura 4.6:	Sinais resultantes do algoritmo implementado em MATLAB: carga puramente resistiva e carga puramente indutiva .....	62
Figura 5.1:	Arquitetura do sistema de teste baseado no uso do equipamento de injeção de corrente .....	66
Figura 5.2:	O sistema de distribuição equivalente monofásico modelado no RSCAD .....	69
Figura 5.3:	Definição dos parâmetros do TC no <i>Draft</i> do RSCAD .....	70
Figura 5.4:	Esquema <i>Hardware-In-The-Loop</i> utilizado para testes no relé SEL 351-S .....	73
Figura 6.1:	Sinais secundários, resultantes do TC modelado em MATLAB, para os seis casos da Tabela 6.1 .....	78
Figura 6.2:	Sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS, para os seis casos da Tabela 6.1 .....	79
Figura 6.3:	Curva IEC Muito Inversa apresentando a resposta da função temporizada inversa do relé SEL 351-S resultante dos casos apresentados na Tabela 6.3 .....	83
Figura 6.4:	Sinais secundários, resultantes do TC modelado em MATLAB, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 1 indicado na Tabela 6.4. ....	85

Figura 6.5: Sinais secundários, resultantes do TC modelado em MATLAB, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 2 indicado na Tabela 6.4 .....	86
Figura 6.6: Sinais secundários, resultantes do TC modelado em MATLAB, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 3 indicado na Tabela 6.4. ....	87
Figura 6.7: Sinais secundários, resultantes do TC modelado em MATLAB, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 4 indicado na Tabela 6.4. ....	88
Figura 6.8: Curva IEC Muito Inversa apresentando a resposta da função temporizada inversa do relé SEL 351-S para o caso 3 com e sem assimetria .....	92
Figura 6.9: Sinais secundários, resultantes do TC modelado em MATLAB, para um caso sem e com fluxo remanescente. ....	93
Figura A.1: S Sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 1 indicado na Tabela 6.4 .....	107
Figura A.2: Sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 2 indicado na Tabela 6.4 .....	108
Figura A.3: Sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 3 indicado na Tabela 6.4 .....	109
Figura A.4: Sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 4 indicado na Tabela 6.4 .....	110
Figura B.1: Sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS, para os casos sem e com fluxo remanescente discutidos na seção 6.4 .....	111

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Cargas nominais para TCs destinados a proteção – Fator de potência de 0,5.....	15
Tabela 3.1: Valores dos parâmetros de ajuste para as curvas IEC.....	49
Tabela 5.1: Dados dos componentes utilizados no sistema de distribuição modelado no RSCAD.....	70
Tabela 6.1: Casos simulados para verificar a influência da carga ( <i>burden</i> ) e da corrente de falta simétrica na saturação do TC.....	77
Tabela 6.2: Tempo de resposta da função de sobrecorrente instantânea do relé SEL 351-S sob os efeitos da saturação do TC provocada pelo <i>burden</i> e corrente de falta simétrica. ....	80
Tabela 6.3: Tempo de resposta da função de sobrecorrente de tempo inverso do relé SEL 351-S sob os efeitos da saturação do TC provocada pelo <i>burden</i> e corrente de falta simétrica .....	82
Tabela 6.4: Casos simulados para verificar a influência da relação X/R da corrente de falta assimétrica na saturação do TC.....	84
Tabela 6.5: Tempo de resposta da função de sobrecorrente instantânea do relé SEL 351-S sob os efeitos da saturação do TC provocada pelo incremento de assimetria na corrente de falta.....	90
Tabela 6.6: Tempo de resposta da função de sobrecorrente de tempo inverso do relé SEL 351-S sob os efeitos da saturação do TC provocada pelo incremento de assimetria na corrente de falta. ....	91
Tabela 6.7: Tempo de resposta da função de sobrecorrente (50 e 51) do relé SEL 351-S sob os efeitos do fluxo remanescente na saturação do TC.....	94



# Lista de Abreviaturas, Siglas e Unidades

A	Ampères
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
D/A	<i>Digital to Analog</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
B	Indução Magnética
COMTRADE	<i>Common Format for Transient Data Exchange</i>
CT	<i>Current Transformer</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DFT	Transformada Discreta de Fourier
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
DT	Dispositivo Temporizador
EMTP	<i>Eletromagnetic Transient Program</i>
FS	Fator de Sobrecorrente
GPC	<i>Giga Processor Cards</i>
GTAI/GTAO	<i>Gigabit Transceiver Analogue Input/Output Card</i>
GTDI/GTDO	<i>Gigabit Transceiver Digital Input/Output Card</i>
GTFPI	<i>Inter-Rack Communication Card</i>
GTWIF	<i>Workstation Interface Card</i>
H	Intensidade de Campo Magnético
HIL	<i>Hardware-In-The-Loop</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
Irms	Corrente eficaz
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PC	<i>Personal Computer</i>
PSRC	<i>Power System Relaying Committe</i>
p.u.	Por unidade
s	Segundos
S	<i>slope</i>

SEP	Sistema Elétrico de Potência
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
Std	<i>Standard</i>
rms	<i>Root mean square</i>
RDPs	Registradores Digitais de Perturbação
RP	<i>Rms to peak</i>
RTC	Relação de Transformação de Corrente
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
TC	Transformador de Corrente
V	Volts
VA	Volt-Ampères
Vca	Tensão alternada
Vrms	Tensão eficaz
Wb	weber
$\Omega$	OHMS

# *Capítulo 1*

---

## *Introdução*

## **1.1 Considerações Iniciais**

Este capítulo apresenta um levantamento bibliográfico a cerca do tema, os motivos aos quais levaram ao desenvolvimento deste trabalho, bem como os principais objetivos deste. Por fim, a forma como foi estruturado o texto é descrita.

## **1.2 Levantamento Histórico**

Na medida em que os sistemas elétricos crescem em tamanho e complexidade, apresentando aumento nos níveis das correntes de falta, maior atenção é necessária com os dispositivos de proteção para garantir sua correta operação. Para tal fim, eles requerem uma reprodução precisa das correntes do sistema. Portanto, os transformadores de corrente (TCs) estão entre os principais componentes de um sistema de proteção, já que eles fornecem o acesso às altas correntes do sistema elétrico por meio de réplicas reduzidas dos sinais, permitindo a identificação correta e oportuna das faltas e dos distúrbios na rede pelos relés de proteção.

A correta operação do sistema de proteção é, portanto, dependente do desempenho dos TCs, os quais, para operarem satisfatoriamente, demandam uma reprodução, a mais exata possível, dos sinais de corrente durante faltas no sistema (SEGATTO e COURY, 2005).

Em oposição a esta característica desejável, os núcleos dos TCs possuem características magnéticas não-lineares, podendo, quando expostos a altas correntes de falta, alcançar elevados níveis de fluxo em seu núcleo. Neste caso a densidade de fluxo poderá ficar acima da capacidade do núcleo, ocorrendo o que se denomina de saturação do TC. Como resultado, a forma da onda da corrente secundária, que chega aos relés de proteção, apresentar-se-á distorcida, levando a consequências indesejáveis na operação destes dispositivos.

Por essa razão, a completa compreensão do comportamento de TCs em regime transitório é de grande relevância para o estudo de proteção de sistemas elétricos.

Diversos trabalhos foram publicados tratando do desempenho dos TCs em regime transitório. O primeiro deles foi feito por Marshall e Lannguth em 1929 (apud GUERRA e MOTA, 2008).

O livro de WRIGHT (1968) constitui uma referência clássica no estudo de TCs. O autor faz análises detalhadas da influência do tipo de carga e do fluxo residual no núcleo magnético.

Para analisar o fenômeno da saturação, a maioria dos trabalhos publicados considerou o uso do ATP (*Alternative Transients Program*) e do EMTP (*Eletromagnetic Transient Program*) para modelagem de TCs sob condições transitórias, onde resultados aceitáveis foram obtidos com sucesso. Muitas dessas pesquisas são encontradas em (MCLAREN et al, 1992), (KEZUNOVIC et al, 1994), (KOJOVIC, 2002), (GUERRA e MOTA, 2007) e (SAWKO, 2008).

Em (MCLAREN et al, 1992), um modelo de TC foi implementado no EMTP. Neste modelo, o ramo de magnetização é representado por um indutor não-linear e as perdas no núcleo são representadas por um resistor não-linear em paralelo com o ramo de magnetização.

Um modelo de TC no qual a histerese é descrita por equações simplificadas e os efeitos das perdas são representados por um resistor linear (perdas por correntes parasitas) e um resistor não-linear (perdas dinâmicas) foi proposto por (GUERRA e MOTA, 2007). Segundo os autores, os resultados obtidos por simulações foram comparados com resultados experimentais, obtendo-se graus de aproximação entre os mesmos.

Os trabalhos referidos se restringem ao caso de TCs com núcleo sem entreferro. Para promover a melhoria do desempenho de TCs em regime transitório são inseridos entreferros não-magnéticos no núcleo (GUERRA e MOTA, 2008). Isto faz com que haja redução dos valores de fluxo residual. Um vasto relatório elaborado pelo (IEEE PSRC, 1976) cita importantes aspectos do desempenho de TCs em regime transitório, incluindo os de núcleo com entreferro, bem como a influência dos mesmos em diferentes esquemas de proteção. O mesmo grupo voltou a publicar outro relatório (IEEE PSRC, 1990) onde são analisadas as características e o desempenho de TCs com pequenos entreferros.

No trabalho publicado por (TZIOUVARAS et al, 2000), foram analisados os modelos matemáticos que poderiam ser utilizados para representar o comportamento

não-linear do núcleo magnético em TCs. Eles compararam os resultados de quatro modelos matemáticos de TCs com resultados de laboratório, onde foram verificadas semelhanças. As características mais importantes para a modelagem do TC foram apresentadas no trabalho. Os autores ressaltaram a importância de testar os relés em condições de regime transitório a fim de garantir um elevado grau de precisão na análise. Também verificaram que cada tipo de relé de proteção apresentava um impacto diferente em decorrência da saturação do TC. Particularmente em sistemas elétricos de distribuição/industriais, a saturação de TCs, devido a elevadas corrente de falta, pode causar uma má operação de relés de sobrecorrente. Por causa deste problema, podem ocorrer perdas de produção de uma planta ou danos em equipamentos críticos conectados a estes sistemas.

Os trabalhos de (LINDERS et al, 1995), (BRIGGER, 1996), (KOJOVIC, 2002) e (KANG, 2004) abordaram a distorção da forma de onda devido à saturação do TC e seu efeito sobre os relés de sobrecorrente eletromecânicos.

Poucos trabalhos têm considerado os efeitos da saturação do TC em relés numéricos. Tal abordagem pode ser encontrada em (ZOCHOOL e BENMOUYAL, 1997), (KOJOVIC, 2002), (EL-AMIN e AL-ABBAS, 2006) e (AL-ABBAS, 2009).

KOJOVIC (2002) considerou o efeito da distorção da forma de onda decorrente da saturação do TC nos relés de sobrecorrente numéricos. O artigo tentou mostrar, teoricamente e através de análises laboratoriais, as influências das harmônicas em vários tipos de relés de proteção. O autor mostrou que estes relés são afetados pela componente DC e pela saturação do TC.

Em (EL-AMIN e AL-ABBAS, 2006) e (AL-ABBAS, 2009) a proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada de um relé numérico foi avaliada considerando sinais de TC provenientes de simulações transitórias no ATP. Nestes trabalhos, foi investigada a influência do TC na operação dos relés de sobrecorrente numéricos, alertando para os problemas causados pela má especificação dos valores nominais de tais equipamentos em sistemas com elevadas correntes de falta. Além disso, os autores citaram que a necessidade de grandes distâncias entre o TC e o relé implica em grandes comprimentos de cabos e, em virtude disto, há um aumento da carga em seu secundário, fator este considerado como um dos maiores responsáveis pela saturação do TC. Na análise realizada, tais fatores causaram tanto retardo no

tempo de operação do relé de sobrecorrente quanto, em alguns casos, sua não operação.

Portanto, a escolha de TCs para estas aplicações está associada com o comportamento destes quando expostos a fatores que podem levar seu núcleo a saturar.

JIUPING e KHOI (2004) ressaltaram que os transformadores de corrente são projetados para suportarem uma corrente de 20 vezes a nominal sem comprometer em mais de 10% a exatidão da corrente secundária, sendo esta especificação definida a partir da aplicação de faltas simétricas e condição de regime permanente. Todavia, para faltas assimétricas, a componente unidirecional da corrente primária pode saturar sobremaneira o núcleo do TC e, ainda, para valores muito menores de corrente.

Para mitigar os efeitos da saturação do TC, dois métodos são conhecidos: (i) aumentar a seção reta do núcleo do TC e, (ii) por meio da redução da carga ligada ao seu secundário. Segundo (ROSELLI, 2007), o primeiro método é dispendioso e o segundo pode ser de difícil implementação. Para (DAVID et al, 2001), ambas as opções podem afetar no custo e na facilidade de aplicação de um TC.

Por isso, medidas compensadoras utilizadas para minimizar os efeitos da saturação sobre os relés de proteção têm sido discutidas. Técnicas utilizadas em sistemas de proteção para detecção e compensação da saturação do TC são tratadas por (SEGATTO e COURRY, 2006), (ROSELLI, 2007), (MONARO et al, 2010) e (HONG e WEI, 2010).

A detecção/correção dos sinais de corrente distorcidos, decorrentes da saturação do TC, não se encontra no escopo desse trabalho. Contudo, seria omissivo falar sobre saturação em TCs sem citar a realidade abrangente deste tema.

Para orientar a seleção de TCs quando sujeitos a fatores que o levam a saturar, um importante guia foi elaborado pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Este documento, o IEEE Std. C37.110 (*Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes*, 2007), contém algumas regras para seleção de TCs para evitar a saturação por corrente alternada (AC) e contínua (DC). Algumas dessas recomendações resultam no aumento do núcleo de TCs. Segundo (KOJOVIC, 2002), em projetos onde é desejável incorporar TCs como parte integrante de religadores e disjuntores, prática comum em sistemas

de distribuição, a dimensão do TC torna-se um fator limitante para tal finalidade.

Para este tipo de aplicação, onde os níveis de curto-circuito são bem mais elevados, a norma IEEE Std. C37.110 (2007) não trata da seleção de TCs e os efeitos da saturação do seu núcleo na proteção de sobrecorrente, sendo ainda uma área pouco conhecida e sem guias publicados.

### 1.3 Motivação e Objetivos

Muito se fala que um relé numérico consegue extrair o correto valor da componente de 60 Hz, mesmo quando o sinal de entrada possuir um alto conteúdo harmônico.

Entretanto, no levantamento histórico apresentado na seção anterior, mostrou-se que a operação da proteção de sobrecorrente de relés numéricos ainda é pouco compreendida quando sujeitos às correntes sob os efeitos da saturação do TC em sistemas elétricos.

É nesse contexto que a investigação através de simulações e testes tem relevância na avaliação da resposta destes relés frente a eventos transitórios que ocasionam a saturação do TC.

A utilização de equipamentos de alta tecnologia para estudar e analisar sistemas de proteção tem se tornado cada vez mais comum. Hoje em dia, o mercado oferece modernas plataformas de testes tais como: equipamentos de injeção de corrente, que geram e reproduzem sinais quando programados para simular situações verdadeiras que acontecem em um sistema, bem como Simuladores Digitais em Tempo Real (RTDS). Este último tem a capacidade de realizar simulações expressando os dados tanto na tela do computador como em saídas digitais e analógicas. Estes dois modos de saídas permitem realizar testes em malha fechada, muitas vezes denominadas de *Hardware-In-The-Loop* (HIL), com dispositivos reais, aumentando assim a credibilidade dos testes (RTDS, 2009). As aplicações em tempo real para proteção de sistemas se mostram viáveis do ponto de vista da velocidade de processamento das informações e, além disso, a disponibilidade destes simuladores favorece a automatização dos testes e melhora a sua repetibilidade (PARKER, 2001).



Fazendo uso das duas ferramentas citadas no parágrafo anterior, este trabalho investiga o comportamento transitório de TCs e os fatores que levam seu núcleo a saturar. Além disso, os sinais resultantes deste fenômeno são utilizados para avaliar a resposta da proteção de sobrecorrente de um relé numérico comercial.

Além de mostrar a viabilidade dos testes em relés a partir de simulação *off-line* e em tempo real, este trabalho destina-se também a conscientizar os profissionais da área de sistemas de proteção sobre a importância dos TCs neste contexto. Tudo é feito através da análise do fenômeno da saturação, bem como dos fatores que podem contribuir com o mesmo, evidenciando também as consequências na proteção de sobrecorrente em sistemas de distribuição expostos a estes eventos.

### 1.4 Organização da Dissertação

Além deste capítulo introdutório, este trabalho contém mais 6 capítulos, referências bibliográficas e três apêndices.

No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos empregados durante o desenvolvimento do trabalho, onde são introduzidos os conceitos principais de TCs e os problemas relacionados à saturação do seu núcleo.

No Capítulo 3 é apresentado o RTDS, as suas funcionalidades, bem como as principais características de *hardware* e *software* deste equipamento, necessárias para a realização de simulação HIL. Uma breve teoria da proteção de sobrecorrente, necessária para o entendimento dos testes realizados neste trabalho de dissertação, também é abordada neste capítulo.

No Capítulo 4 é apresentada toda a formulação utilizada na implementação em MATLAB de um modelo matemático de TC, baseado na teoria publicada pelo *Power System Relaying Committee* (PSRC) por (SWIFT, 2001), do qual serão originados os sinais COMTRADE (*Common Format for Transient Data Exchange*) para análise da saturação e os efeitos em um relé numérico comercial.

No Capítulo 5 são descritas as duas metodologias de testes utilizadas neste trabalho para analisar a saturação de TCs e realizar testes para avaliar a resposta da proteção de sobrecorrente de um relé numérico frente a este fenômeno. Na primeira, é apresentado o sistema de aquisição dos sinais secundários do TC, em formato

## **Capítulo 1 - Introdução**

---

COMTRADE, os quais são usados pelas caixas OMICRON para testes em um relé de proteção. Em seguida, a metodologia baseada no uso do RTDS, utilizando um modelo de TC próprio deste simulador, é apresentada. As características do modelo de TC utilizado, o sistema de distribuição modelado para a coleta dos sinais primários utilizados no TC, assim como a arquitetura do sistema de testes de relés por simulação HIL são abordados.

No capítulo 6 são apresentados os resultados e discussões dos testes realizados em um relé numérico comercial considerando a saturação do TC a partir de diferentes casos selecionados. O desempenho das funções de sobrecorrente instantânea e de tempo inverso deste relé são avaliadas e comparadas em ambas as metodologias de testes apresentadas no capítulo 5.

No capítulo 7 são feitas as considerações finais do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas que compõem a base para elaboração deste trabalho, além de três apêndices: os apêndices A e B que mostram alguns dos sinais resultantes da metodologia de testes usando o RTDS, e o apêndice C que apresenta o trabalho aprovado para publicação, fruto deste estudo.

## *Capítulo 2*

---

# *Fundamentos dos Transformadores de Corrente*

## 2.1 Considerações Iniciais

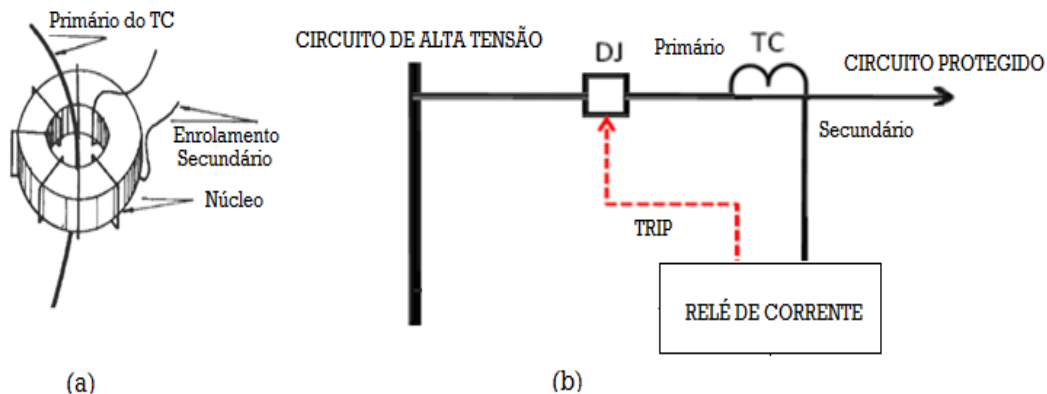
Como o trabalho concentra-se na avaliação da resposta de relés de sobrecorrente numéricos frente ao fenômeno da saturação de TCs, neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais dos TCs, os fatores que influenciam na saturação do seu núcleo e os critérios definidos nas normas existentes para evitar a saturação.

## 2.2 Transformadores de Corrente

Segundo (CAMINHA, 1977), devido às altas correntes envolvidas em um sistema elétrico de potência, torna-se necessária a redução dessas magnitudes com o fim de monitorar o sistema a partir de valores suportáveis pelos instrumentos secundários, tais como os relés de proteção alimentados por correntes. Estes são atuados por correntes supridas por TCs, os quais relacionam a grandeza medida no seu primário a valores de proporções reduzidas no seu secundário, de forma que tais valores tornam-se aceitáveis para uso nos dispositivos secundários. Além disso, os TCs fornecem isolamento galvânico, permitindo assim o uso seguro dos dispositivos de proteção, controle e medição ligados em baixa tensão e não nos circuitos de alta tensão.

Um TC consiste basicamente de um núcleo de ferro, um enrolamento primário e um enrolamento secundário, estando o enrolamento primário, normalmente formado por poucas espiras, ligado em série com o circuito de alta tensão e/ou com um circuito de baixa tensão com elevada corrente. A impedância do TC, vista do lado do primário, é desprezível quando comparada com a do sistema ou da carga à qual estará ligado, independentemente da carga (*burden*) instalada no enrolamento secundário. Desta forma, a corrente que circulará no primário de um TC é ditada pelo circuito de potência, denominado de circuito primário. A Figura 2.1(a) mostra o arranjo básico de um TC, contendo um enrolamento primário, um secundário e um núcleo magnético. O enrolamento secundário é geralmente distribuído e enrolado sobre um núcleo, normalmente em forma toroidal, de modo a

minimizar a indutância de dispersão. A este enrolamento secundário são ligados os circuitos de entrada dos diversos medidores e/ou relés, como representado na Figura 2.1(b).



**Figura 2.1 - (a) Constituição básica de um TC com a disposição dos seus enrolamentos e (b) Conexão do TC aos dispositivos de proteção.**

Os TCs podem ser utilizados tanto na medição quanto na proteção. Os TCs utilizados para medição devem possuir características tais que mantenham uma alta exatidão nas correntes de carga, podendo, entretanto, apresentar erros significativos para elevadas correntes de falta (curtos-circuitos).

Por sua vez, os TCs utilizados para a proteção são projetados para que apresentem erros relativamente pequenos mesmo durante as condições de curtos-circuitos. Em outras palavras, de acordo com normas nacionais e internacionais, este tipo de TC deverá manter a sua classe de exatidão, desde a corrente nominal até 20 vezes esta corrente.

Sob condições de estado estacionário, todo o desempenho do TC pode ser medido a partir da sua equação fundamental dada por

$$v_e = 4,44 \cdot \beta_m \cdot A \cdot f \cdot N \quad (2.1)$$

onde  $\beta_m$  é a máxima densidade de fluxo no núcleo (Tesla),  $A$  é a área de seção transversal do núcleo ( $m^2$ ),  $N$  é o número de espiras do enrolamento secundário,  $f$  é a frequência do sistema (Hertz) e  $v_e$  é a força eletromotriz do enrolamento secundário. O uso da equação fundamental do TC expressa em (2.1) é útil quando as informações sobre as características da densidade do fluxo do núcleo e a área da

seção transversal são disponíveis. Através dessa equação é possível entender os fatores que contribuem para a saturação, como abordado posteriormente.

Considerando que o desempenho dinâmico, também dito transitório, dos TCs e relés por ocasião de curtos-circuitos são aspectos importantes a serem considerados pelo engenheiro de proteção, o máximo cuidado deve ser tomado durante a especificação de TCs para um dado sistema, de modo a assegurar uma boa resposta frente os distúrbios que podem ocorrer na rede elétrica. Tais especificações seguem padrões determinados por normas nacionais e internacionais.

Deste modo, na seção seguinte são apontadas as principais características de um TC para serviço de proteção.

### 2.2.1 Principais Características de um TC de Proteção

Os TCs possuem padronização nas suas características, cujas especificações seguem regras determinadas por normas técnicas. Neste trabalho foram adotadas a norma nacional NBR 6856 (Transformador de Corrente – Especificação, 1992) da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e as normas internacionais IEEE Std. C57.13 (*Requirements for Instrument Transformers*, 2008) e IEEE Std. C37.110 (2007).

Essas normas especificam uma série de características que não são tratadas aqui. As características referidas aos TCs para serviços de proteção e significativas para o entendimento do trabalho são abordadas a seguir.

#### 2.2.1.1 Corrente Nominal e Relação de Transformação

Segundo a norma NBR 6856 (1992), para correntes nominais secundárias de 5A, as correntes nominais primárias devem possuir valores na faixa de 5 a 8000A. A Figura 2.2 representa a disposição dos enrolamentos primário ( $n_p$ ) e secundário ( $n_s$ ) do circuito magnético do TC associadas às suas respectivas correntes ( $i_p$ ) e ( $i_s$ ).

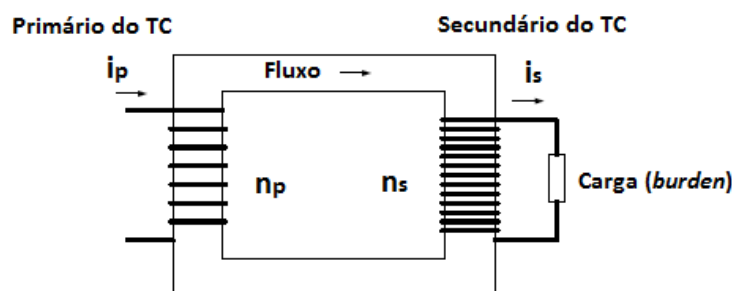


Figura 2.2 - Circuito magnético de um TC.

Segundo esta norma, o TC ideal possui a relação ampères-espiras do primário exatamente igual à magnitude da relação ampères-espiras do secundário, ou seja:

$$n_p \cdot i_p = n_s \cdot i_s \quad (2.2)$$

Sendo assim, a relação entre a corrente primária nominal e a corrente secundária nominal define a Relação de Transformação de Corrente (RTC), ou relação de espiras, como definido na equação 2.3.

$$RTC = \frac{i_p}{i_s} = \frac{n_s}{n_p} \quad (2.3)$$

A RTC, por exemplo, pode atingir valores de 1600:1 quando se tem 8000A primários para 5A secundários (8000-5A). TCs especiais podem ter correntes nominais primárias bem acima deste valor.

### 2.2.1.2 Classe de Exatidão

A norma NBR-6856 (1992) define características distintas para TCs destinados a serviços de medição e de proteção. Estes dois tipos de TCs possuem classes de exatidão diferentes. Tal característica corresponde ao erro máximo de transformação esperado, se respeitada a carga padrão especificada. Em particular, os TCs de proteção possuem classe de exatidão na faixa de 5% ou 10%, segundo a norma brasileira, e 10% segundo a norma IEEE Std. C57.13 (2008). Para tal

classificação leva-se em consideração somente o erro de relação, pois, afinal, somente o que interessa para os TCs de proteção é a corrente no secundário com relação à corrente no primário.

### 2.2.1.3 Fator de Sobrecorrente (FS)

Este termo expressa a relação entre a máxima corrente de curto-circuito eficaz que pode passar pelo primário e a corrente primária nominal, de modo que o erro de sua classe de exatidão seja mantido. Tanto para as normas nacionais, quanto internacionais, o valor máximo desse fator é igual a 20. O FS é muito importante para dimensionar os TCs de proteção, tendo em vista que os mesmos devem sempre apresentar um limite de erro dentro da classe de exatidão ( $\pm 5\%$  ou  $\pm 10\%$ ), desde a corrente nominal até o FS estabelecido, conforme já mencionado.

### 2.2.1.4 Tensão Secundária Nominal

Segundo a NBR 6856 (1992) e a IEEE Std. C57.13 (2008), a tensão secundária nominal é a tensão nos terminais da carga quando aplicada ao TC uma corrente secundária 20 vezes maior que a corrente secundária nominal, sem que o erro de relação exceda o valor especificado. Esta tensão representa um valor em algum ponto no joelho da curva de saturação.

### 2.2.1.5 Carga Nominal (*burden*)

Todas as considerações sobre exatidão dos TCs estão condicionadas ao conhecimento da carga dos mesmos. Os catálogos dos fabricantes de dispositivos de proteção e medição fornecem as cargas (*burden*) que os mesmos representam para os TCs. A isto se deve ainda adicionar a carga imposta pela fiação. Para algumas normas a carga nominal deve ser representada em volt-ampères (VA), sendo esta o produto da impedância da carga nominal pelo quadrado da corrente secundária nominal. Alguns destes valores são especificados na Tabela 2.1. Nesta tabela observa-se que a carga nominal padronizada é representada pela letra C seguida do valor numérico desta carga em VA, segundo a NBR 6856 (1992). Ou, de acordo



## Capítulo 2 – Fundamentos dos Transformadores de Corrente

com a norma IEEE Std. C57.13 (2008), pela letra B seguida de um número que corresponde ao valor da impedância da carga nominal em OHMS ( $\Omega$ ).

Pode-se observar nesta mesma tabela a tensão nos terminais da carga quando a corrente atinge 20 vezes a corrente nominal, em TCs de 5A.

**Tabela 2.1 – Cargas nominais para TCs destinados a proteção – Fator de potência de 0,5.**

**Fonte: NBR 6856 e IEEE C57.13.**

Norma		Potência Aparente (VA)	Resistência ( $\Omega$ )	Reatância Indutiva ( $\Omega$ )	Impedância Nominal ( $\Omega$ )	Tensão Secundária Nominal (20A x 5A) (V)
NBR 6856	IEEE C57.13					
C 25	B1	25	0,50	0,866	1,0	100
C 50	B2	50	1,00	1,732	2,0	200
C 100	B4	100	2,00	3,464	4,0	400
C 200	B8	200	4,00	6,928	8,0	800

### 2.2.1.6 Impedância Secundária na proteção

A impedância conectada ao circuito secundário influencia no erro de relação. A obtenção da impedância total do circuito para efeitos práticos de especificação do TC utiliza como referência as cargas nominais. A norma NBR 6856 (1992) divide os TCs para serviços de proteção em duas classes quanto a sua impedância:

- Classe A (ou T pela norma IEEE Std. C57.13): os TCs pertencentes a esta classe possuem impedância do enrolamento secundário que não pode ser desprezada, ou seja, a reatância de dispersão do enrolamento secundário possui valor significativo e deve ser considerada nos modelos a serem usados.
- Classe B (ou C pela norma IEEE Std. C57.13): os TCs pertencentes a esta classe possuem baixa impedância interna. A reatância de dispersão do enrolamento secundário possui valor desprezível e não é considerada no cálculo da impedância total do circuito.

### 2.2.1.7 Especificação final da Carga e Classe de Exatidão

Considerando todos os aspectos anteriores, um TC para serviço de proteção deve ser especificado indicando a classe de exatidão (5 ou 10%), o tipo de impedância secundária (A ou B) e a tensão secundária à 20 vezes a corrente nominal secundária. Como exemplo, um TC 10B200, significa um TC tipo B, que irá apresentar um limite máximo de erro de  $\pm 10\%$  quando a corrente secundária nominal aumentar de 20 vezes, aparecendo no terminal da carga de  $2 \Omega$  (ou 50 VA) uma tensão de 200 V ( $20 \times 5 \times 2$ ).

Cabe reafirmar que esta tensão representa um ponto no joelho da curva de saturação do TC, conforme explicitado posteriormente.

### 2.2.2 Modelagem do TC

Sabe-se que o TC ideal é aquele que reflete em seu secundário a mesma forma de onda da corrente em seu primário para qualquer situação, com uma magnitude proporcional à relação de transformação (RTC). Da equação (2.2), para um TC ideal, tem-se então que:

$$n_p \cdot i_p - n_s \cdot i_s = 0 \quad (2.4)$$

Dividindo ambos os lados da equação (2.4) por  $n_s$ , obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{i_p}{RTC} - i_s = 0 \quad (2.5)$$

onde  $\frac{i_p}{RTC} = i'_p$  é a corrente primária referida ao secundário.

Entretanto, deve-se levar em conta o circuito equivalente do TC, o qual pode ser representado como no modelo da Figura 2.3.

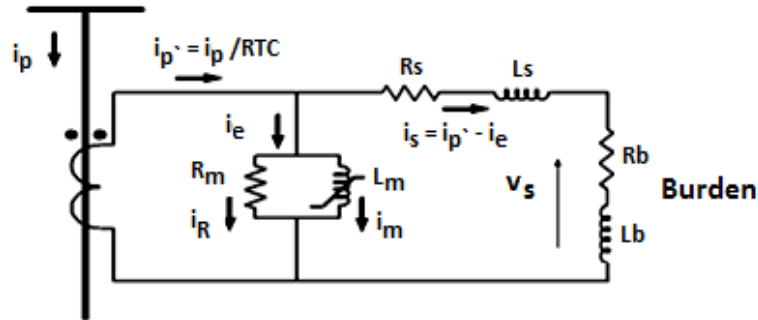


Figura 2.3 - Modelo do circuito equivalente do TC.

Na prática, é impossível manter a relação ideal no TC, pois se as duas correntes fossem iguais, não existiria fluxo no núcleo. Na realidade a corrente  $i_p/RTC$  refletida no secundário é dividida em duas correntes. Uma é a corrente secundária  $i_s$  que circula pela impedância do *burden* ( $Z_b$ ) e a outra é a corrente de excitação  $i_e$  que passa através do ramo magnetizante para manter o fluxo no núcleo do TC. Este ramo funciona como se fosse um *shunt*, introduzindo um erro na relação de transformação. Por sua vez, a corrente de excitação ( $i_e$ ), é ainda decomposta em duas componentes: uma que se refere às perdas no ferro provenientes da histerese e das correntes de Foucault ( $i_R$ ) e outra que é a componente de magnetização ( $i_m$ ), responsável em prover o fluxo magnético ao núcleo, conforme ilustrado na Figura 2.3 (ROSELLI, 2007). Dessa forma, a equação para um TC real será dada por:

$$\frac{i_p}{RTC} - i_s = i_e \quad (2.6)$$

Na Figura 2.3 o enrolamento primário do TC é percorrido normalmente pela corrente de carga do sistema elétrico, com queda de tensão desprezível, de modo que a resistência e a reatância de dispersão de seu enrolamento primário podem ser desconsideradas. Já o enrolamento secundário representado no circuito provoca uma queda de tensão interna devida à resistência ( $R_s$ ) e a reatância de dispersão ( $L_s$ ). Esta última desprezada nos TCs do tipo B. Por fim, a corrente secundária ( $i_s$ ) provê a tensão terminal sobre a carga secundária ( $Z_b$ ).

Portanto, a presença da corrente de excitação ( $i_e$ ) implicará numa diferença entre  $i_p/RTC$  e  $i_s$  tanto na amplitude, quanto no defasamento angular. Essa diferença

relacionada ao valor da corrente primária é denominada de erro de relação ( $\varepsilon$ ) de um TC e é dado pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{i'_p - i_s}{i_p} = \frac{i_e}{i_p} \quad (2.7)$$

O erro definido na equação (2.7) determinará o quanto a corrente primária será refletida erroneamente no secundário do TC.

Usualmente, as normas tratam o erro como uma relação entre a corrente de excitação e a corrente secundária. Foi mostrado nas seções anteriores que o TC estará dentro de sua classe de exatidão quando o seu erro de relação percentual não for superior ao especificado, desde a corrente secundária nominal até 20 vezes essa corrente. Matematicamente, tem-se que:

$$\varepsilon \% = \frac{i_e}{20i_s} \times 100\% \quad (2.8)$$

Para um TC com corrente secundária nominal de 5 A, obtém-se:

$$\varepsilon \% = \frac{i_e}{100} \times 100\% \rightarrow \varepsilon \% = i_e \% \quad (2.9)$$

Este equacionamento mostra que para uma classe de exatidão de 10% (erro máximo permitido), a corrente  $i_e$  deverá assumir um valor máximo de 10 A.

### 2.2.3 Saturação do TC

As abordagens realizadas nas seções anteriores indicam que os TCs devem ser projetados para suportar valores de corrente superiores às correntes em regime, decorrentes das condições anormais de operação do sistema. Entretanto, quando as faltas ocorrem com correntes além dos níveis esperados, o núcleo do TC poderá saturar e produzir significativa distorção na forma de onda da corrente secundária refletida.

## Capítulo 2 – Fundamentos dos Transformadores de Corrente

O núcleo dos TCs para proteção possui baixa permeabilidade magnética e somente irá saturar para valores elevados de densidade de campo magnético. Em núcleos de aço silício do tipo hypersil M-5, ou similar, este valor gira em torno de 18.000 a 20.000 Gauss. Quantitativamente, como já mencionado, estes valores correspondem a uma corrente primária de 20 vezes o seu valor nominal, sem que ocorram distorções (erros) acima do permitido.

Durante essas ocorrências, portanto, é importante um bom entendimento da resposta do TC, em regime de saturação, para avaliar a forma de onda secundária, bem como o impacto nos dispositivos de proteção a ele conectados.

Para entender o fenômeno da saturação, deve-se considerar a tensão secundária máxima a partir da qual o TC passa a sofrer os efeitos da saturação. A partir deste valor, ele não atende mais aos seus requisitos de sua classe de exatidão. O conhecimento deste valor de tensão se dá pela curva de excitação (ou saturação) típica de cada TC, que relaciona a tensão secundária de excitação ( $V_s$ ) e a corrente de excitação do núcleo ( $i_e$ ).

As curvas de excitação são geralmente expressas em escala logarítmica, obtidas a partir de testes em laboratório ou geradas por cálculos durante o processo de fabricação do TC. A Figura 2.4 ilustra uma família de curvas de um TC multirelação, ANSI classe C, para as diversas relações de transformação.

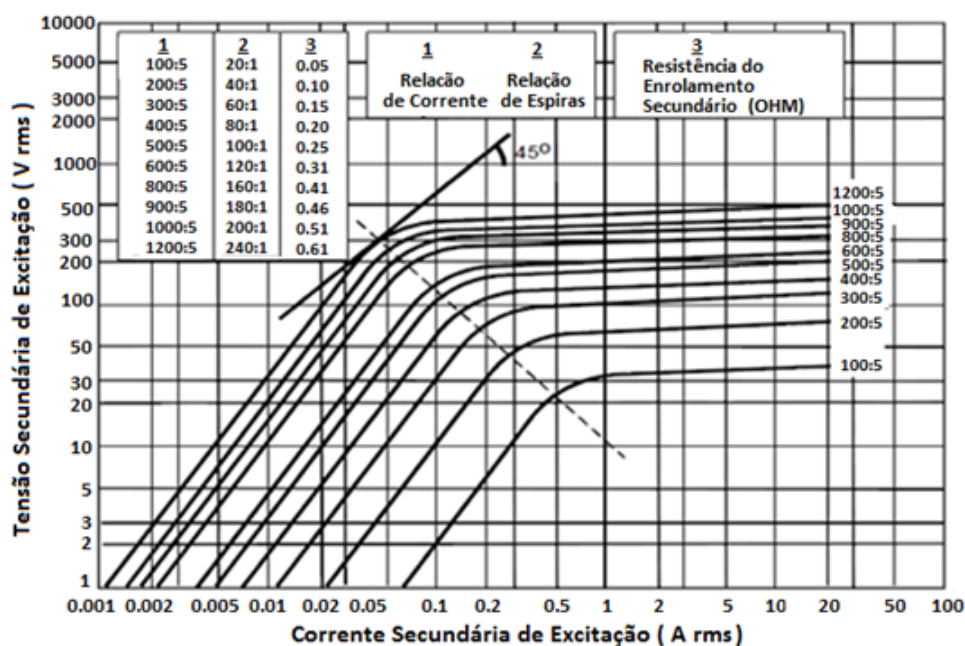


Figura 2.4 – Curvas de excitação de TCs classe C com variadas relações de transformação  
Fonte: Figura adaptada de IEEE Std. C37. 110 (2007).

Observa-se na Figura 2.4 que quando a tensão entregue à carga conectada ao secundário do TC é baixa, a corrente de excitação do núcleo também é baixa.

Entretanto, o fluxo no núcleo do TC aumenta para um incremento da tensão através do enrolamento secundário, causado por uma elevação de corrente ou uma carga excessiva, acima do valor padronizado. Nota-se na Figura 2.4 que a partir de certa região da curva de excitação, haverá um incremento desproporcional na corrente de excitação com relação à sua respectiva tensão.

Para uma melhor análise destes conceitos, a Figura 2.5 ilustra uma curva de saturação com suas regiões e pontos de interesse discriminados. Observa-se nesta figura que o joelho da curva de excitação é o ponto a partir do qual é caracterizada tal desproporcionalidade citada no parágrafo anterior. 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 de transformação são desprezíveis. Contudo, para valores acima do joelho, o núcleo encontra-se em processo de saturação e a operação do TC poderá apresentar erros consideráveis, ocasionando distorções significativas na forma de onda da corrente secundária.

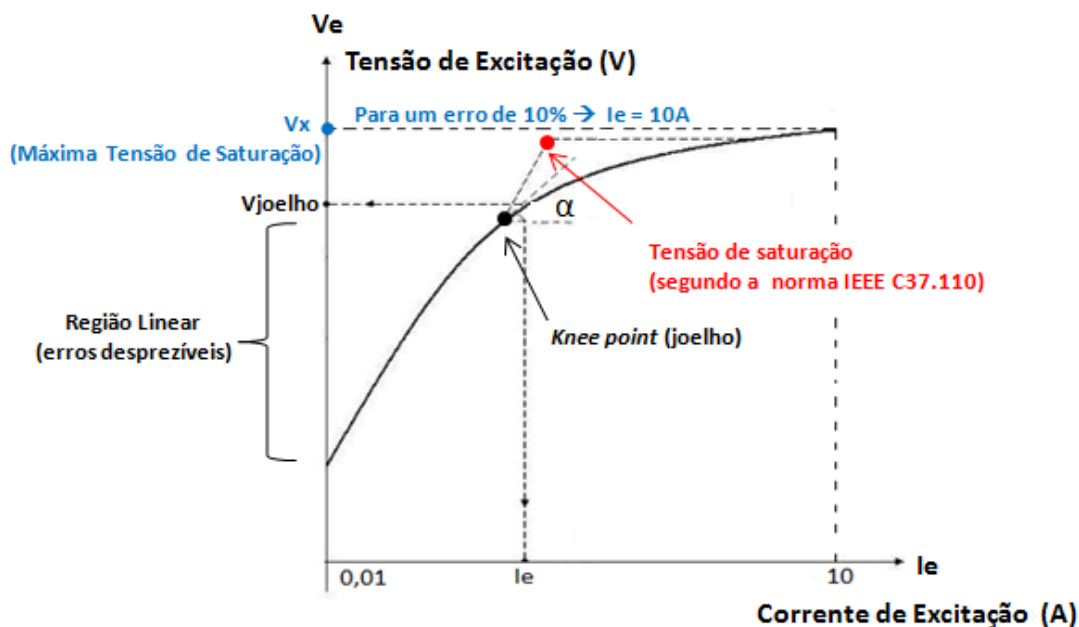


Figura 2.5 – Curva de saturação típica de um TC e seus pontos principais.

ZOCHOOL (2004) destaca, em livro de sua autoria, que apesar da curva de saturação ter um valor do ponto de joelho bem definido, ela não tem um ponto

discernível de saturação. As normas IEEE e IEC (*International Electrotechnical Commission*) definem o ponto de joelho de formas distintas.

Segundo a norma IEEE Std. C57.13 (2008), para TCs com núcleo sem entreferro (*nongapped*), o joelho da curva de excitação é definido como o ponto em que a tangente da curva forma um ângulo  $\alpha$  de 45° com a abscissa, como ilustrado pela linha tracejada na Figura 2.4. Já para TCs com núcleos com entreferro (*gapped*) esse ângulo  $\alpha$  é de 30°. A definição de ponto de joelho da curva exposta na Figura 2.5 obedece a essa norma.

Já a norma internacional IEC, a partir do guia IEC 60044 (*Instrument Transformers*, 1992), 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 curva representada na Figura 2.5 também indica o valor da tensão de saturação ( $V_x$ ). Assim como na norma IEEE C37.110 (2007), seu valor é definido a partir da interseção das partes retas da curva de saturação, ou seja, da reta da região não saturada e da reta da região saturada. Já o valor máximo da tensão de saturação, para uma corrente secundária de 20 vezes a corrente nominal do TC, é determinado para uma corrente de 10 ampères.

Outras definições para o ponto de joelho são utilizadas. Alguns fabricantes especificam esse ponto como sendo o valor eficaz de tensão de excitação que produz um pico de densidade de fluxo equivalente a 18.000 a 20.000 Gauss. Segundo a norma IEEE Std. C37.110 (2007), há fabricantes que consideram este ponto como o valor de tensão que produz uma corrente de excitação igual à corrente secundária nominal.

De qualquer modo, apesar de algumas divergências entre as normas, a saturação do TC é dependente de diversos fatores que, agindo conjuntamente, tornam complexa a sua análise. A seção seguinte aborda os principais fatores ocasionadores deste fenômeno.

### 2.2.3.1 Fatores de influência na saturação

Nas seções anteriores mostrou-se que a saturação do núcleo do TC fará com que a corrente primária seja refletida erroneamente no enrolamento secundário.

Segundo a norma IEEE Std. C37.110 (2007), a saturação depende do projeto físico do TC, do material que compõe seu núcleo, da carga (*burden*) ligada ao secundário, do fluxo magnético remanescente no núcleo, do nível da corrente de falta, do *point-on-wave* e da relação X/R do sistema. Estes dois últimos fatores podem resultar em uma componente exponencial de corrente contínua (*offset dc*) mais acentuada ou menos acentuada (em magnitude e duração). A seguir alguns destes fatores são abordados com mais detalhes.

### ✓ Correntes de Curto-Circuito

Um dado importante na consideração da corrente de falta é que ela pode apresentar uma componente contínua aperiódica (*offset dc*), dando origem à assimetria, que depende do valor da tensão no instante da sua ocorrência (*point-on-wave*). Se a tensão no momento da falta for nula, a assimetria será máxima, para circuitos puramente indutivos. No outro extremo, para o mesmo circuito indutivo, caso a tensão no instante do curto seja máxima, a falta será simétrica, ou seja, possuirá apenas a componente AC.

A componente contínua da corrente de curto-circuito, responsável por essa assimetria, decai exponencialmente, sendo sua constante de tempo função da relação X/R da rede. Um exemplo de forma de onda de curto-circuito, considerando máxima assimetria é apresentado na Figura 2.6.

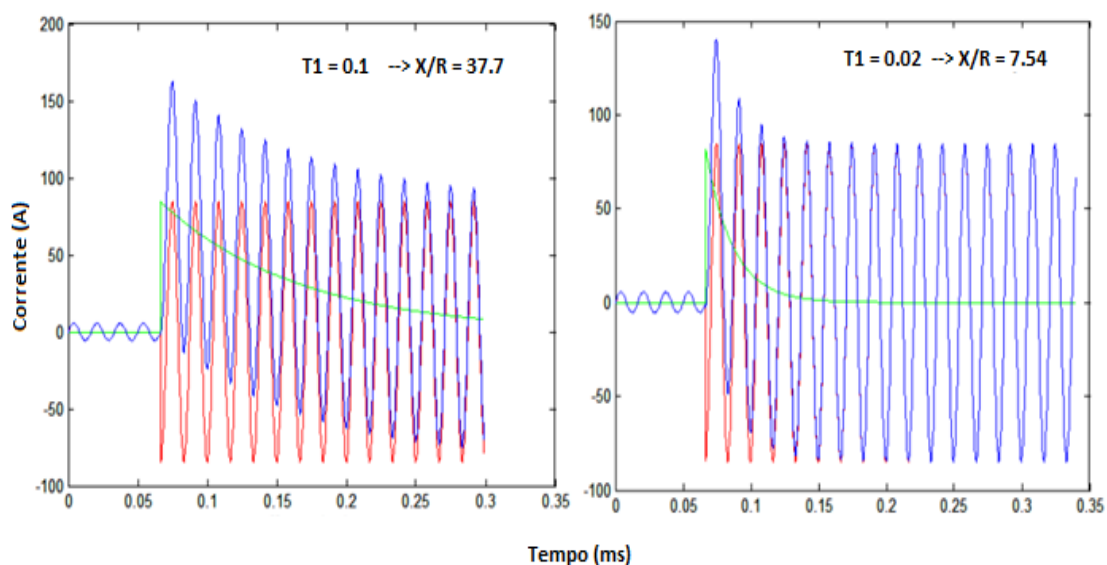


Figura 2.6 – Corrente de curto-circuito totalmente assimétrica para diferentes valores de X/R.



Observa-se na figura anterior que uma maior relação  $X/R$  acarretará num decaimento exponencial mais lento e deixará a forma de onda deformada por um maior período de tempo ( $T1$ ).

É importante salientar que o critério de 20 vezes a corrente nominal, como sendo o limite para que o TC não exceda a sua classe de exatidão, somente é válido para correntes de falta puramente simétricas. Em outras palavras, evita-se a saturação AC utilizando-se tal critério.

Já na presença de componente contínua aperiódica na corrente de falta, o TC poderá saturar para valores de corrente de falta mesmo abaixo de 20 vezes a corrente nominal, dependendo da relação  $X/R$  do sistema, bem como de outras condições, como o *burden* ou fluxo remanescente.

As considerações feitas anteriormente a cerca da corrente de curto-circuito podem ser facilmente entendidas a partir da análise do circuito RL série, com excitação senoidal, representado na Figura 2.7. Este circuito pode corresponder, por exemplo, a uma simplificação do circuito equivalente de um sistema elétrico.

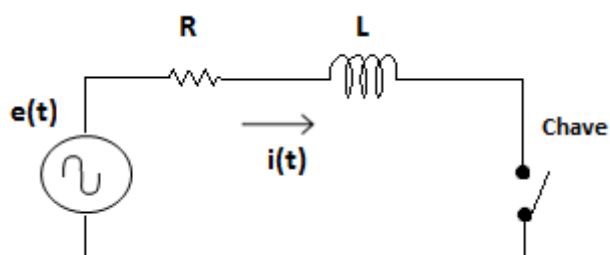


Figura 2.7 – Circuito RL com excitação senoidal para análise da corrente de curto-circuito.

O comportamento da corrente  $i(t)$  no circuito representado na Figura 2.7 e no qual a chave fecha no instante  $t = 0$  é descrito pela equação diferencial dada por:

$$e(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad (2.10)$$

onde

$$e(t) = E_{\max} \sin(\omega t + \phi) \quad (2.11)$$

Combinando as equações (2.10) e (2.11) e resolvendo-se a equação diferencial, o resultado será a equação geral da corrente de curto-circuito, expressa por:

$$i(t) = \frac{E_{\max}}{|z|} \text{sen}(\omega t + \phi - \theta) + \frac{E_{\max}}{|z|} \text{sen}(\theta - \phi) e^{-t/T_1} \quad (2.12)$$

A equação anterior pode ser reduzida a:

$$i(t) = I \cdot \text{sen}(\omega t + \phi - \theta) + I \cdot \text{sen}(\theta - \phi) e^{-t/T_1} \quad (2.13)$$

onde:

$I$  é a magnitude da corrente de falta;

$|z| = \sqrt{(R^2 + X^2)}$  é a impedância do sistema primário ( $R$  e  $L$  são suas respectivas resistência e reatância);

$T_1 = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega R}$  é a constante de tempo primária do sistema até o ponto de falta em segundos;

$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{X}{R} \right)$  é o ângulo da impedância até o ponto de falta;

$\phi$  é o ângulo de incidência da falta ( $\phi = 90^\circ$  para uma corrente de falta totalmente simétrica e  $\phi = 0^\circ$  para uma corrente de falta totalmente assimétrica, considerando  $R=0$ ).

Na equação (2.13) a primeira parcela do segundo membro corresponde à corrente AC de curto-circuito e a segunda parcela refere-se à corrente transitória ou componente DC aperiódica.

Considerando esta formulação do curto-circuito, é possível avaliar a evolução do fluxo no núcleo do TC e entender melhor o fenômeno da saturação. Para isso, seja a hipótese de curto-circuito com máxima assimetria:

$$i_{cc}(t) = -I [\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{T_1}}] \quad (2.14)$$

## Capítulo 2 – Fundamentos dos Transformadores de Corrente

Para analisar os efeitos desta corrente de curto para um fluxo máximo, considere um TC sem perdas e com *burden* resistivo, conforme esquema representado na Figura 2.8.

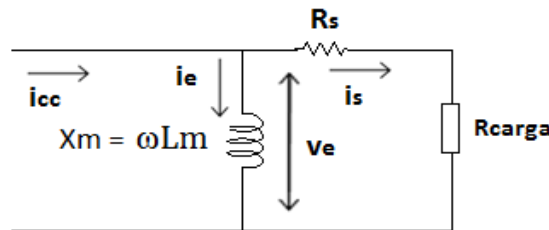


Figura 2.8 – Circuito equivalente de um TC sem perdas e com carga resistiva para avaliação da evolução do fluxo no núcleo do TC.

A partir do circuito da Figura 2.8, a tensão no ramo magnetizante ( $v_e$ ) pode ser obtida por:

$$v_e = L_m \frac{di_e}{dt} = R_t i_s \quad (2.15)$$

onde  $R_t = R_{carga} + R_s$  e sendo  $L_m$  constante.

Da equação (2.6) tem-se:

$$i_s = i_{cc} - i_e \quad (2.16)$$

Combinando as equações (2.14), (2.15) e (2.16), obtém-se a seguinte expressão para a equação da corrente secundária:

$$i_s = I \left[ \frac{\alpha \cdot e^{-\alpha \cdot t} - \gamma \cdot e^{-\gamma \cdot t}}{\alpha - \gamma} + e^{-\alpha \cdot t} \cdot \text{sen}^2 \varphi + \cos \varphi \cdot \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (2.17)$$

onde:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{R_t}{\omega L_m}\right);$$

$\gamma = 1/T_1$  é o inverso da constante de tempo do sistema;

$\alpha = 1/T_2$  é o inverso da constante de tempo do TC ( $T_2 = \frac{L_m}{R_t}$ ).

Sabe-se que o fluxo ( $\lambda$ ) está associado à tensão de excitação ( $v_e$ ) conforme equação (2.18).

$$\lambda = \int_0^t v_e dt = \int_0^t R_t i_s dt \quad (2.18)$$

Substituindo a equação (2.17) na (2.18), a expressão do fluxo passa a ser dada por:

$$\lambda = R_t \cdot I \cdot \left[ \left( \frac{e^{-\gamma \cdot t} - e^{-\alpha \cdot t}}{\alpha - \gamma} - \frac{e^{-\alpha \cdot t} \cdot \text{sen} \varphi}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)}} \right) + \frac{\text{sen}(\omega t + \varphi)}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)}} \right] \quad (2.19)$$

Observa-se na equação do fluxo em (2.19), que o fluxo possui duas parcelas: uma senoidal alternada e outra exponencial contínua (entre os parênteses).

Ao se considerar  $L_m \gg R_t$  e  $\varphi = 0$ , a equação (2.19) pode ser simplificada a:

$$\lambda = \frac{R_t I}{\alpha - \gamma} \cdot [e^{-\gamma \cdot t} - e^{-\alpha \cdot t}] + \frac{R_t \cdot I}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)}} \text{sen}(\omega t) \quad (2.20)$$

Nota-se na equação (2.20), de modo mais evidente, a presença de uma componente AC e outra DC. O termo DC é composto de duas parcelas exponenciais, uma definida pela constante de tempo primária ( $T_1$ ) e outra pela constante de tempo do TC ( $T_2$ ).

Sabe-se que a componente DC depende da relação X/R do circuito, sendo esta dependente da impedância até o ponto da ocorrência do curto-circuito. Em faltas próximas à fonte geradora, esta relação pode chegar a 70 (BEEMAN, 1995). Por outro lado, para faltas longe da geração, tais como em sistemas de distribuição e industriais, a relação X/R é pequena e a componente DC decai rapidamente.

Se ambos os termos da equação (2.20) são divididos por  $R_t \cdot I$ , um fluxo normalizado (em p.u.) é obtido e sua evolução com o tempo pode ser obtida. Como exemplos, a Figura 2.9 ilustra tal comportamento para um sistema com  $T_1 = 0,053$  s ( $X/R = 20$ ) e a Figura 2.10 para um sistema com  $T_1 = 0,013$  s ( $X/R = 5$ ).

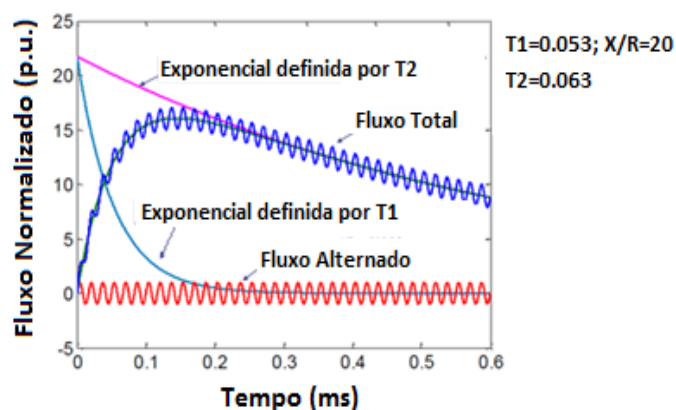


Figura 2.9 – Evolução do fluxo para T2 = 0,063 e T1 = 0,053 (X/R = 20).  
 Fonte: Figura adaptada de (SILVEIRA e BALDWIN, 2007).

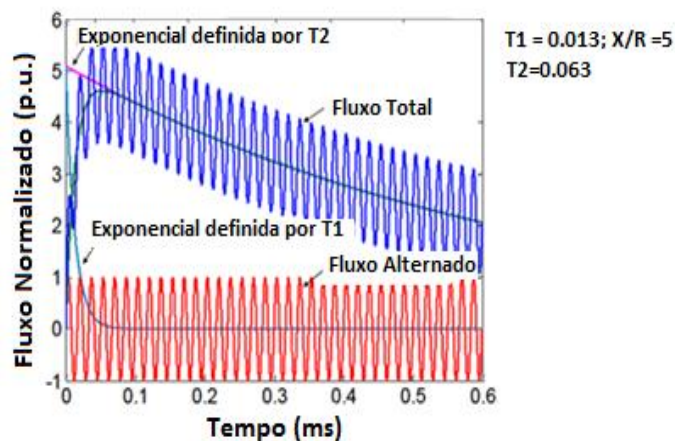


Figura 2.10 – Evolução do fluxo para T2 = 0,063 e T1 = 0,013s (X/R = 5).  
 Fonte: Figura adaptada de (SILVEIRA e BALDWIN, 2007).

Todos os núcleos de TCs têm um nível de saturação, o qual pode ser calculado através da expressão:

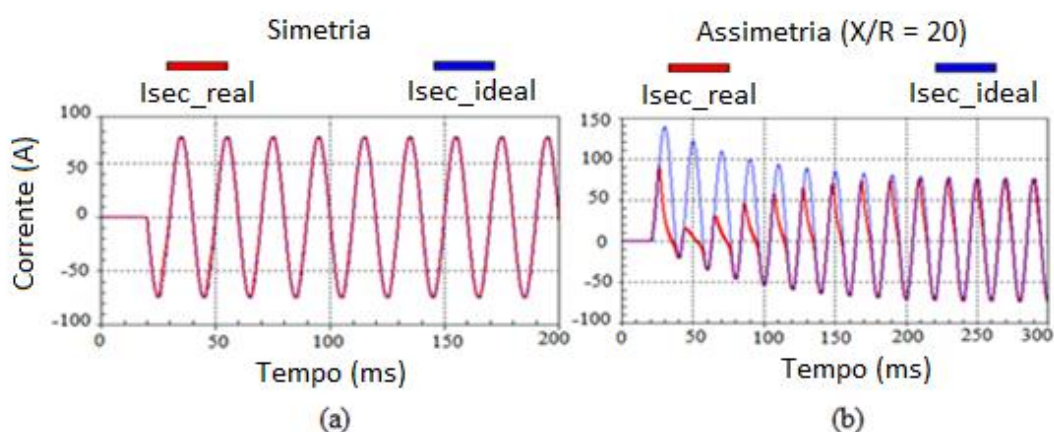
$$K_s = \frac{V_x}{V_s} \quad (2.21)$$

onde  $K_s$  é normalmente chamado de fator de saturação, conforme a norma IEEE Std. C37.110 (2007),  $V_x$  é a tensão de saturação e  $V_s$  é tensão secundária de falta simétrica.

Dependendo do fator  $K_s$ , o TC poderá ou não entrar em saturação. Supondo os casos das Figuras 2.9 e 2.10, o primeiro entrará em regime de saturação logo nos

primeiros ciclos, para um fator  $K_s$  igual a 6 p.u., enquanto que para o segundo, para o mesmo fator  $K_s$ , o TC não irá saturar.

Visto que a corrente de curto-circuito irá influenciar no fluxo do TC e conseqüentemente na saturação do seu núcleo, a Figura 2.11 apresenta a forma de onda secundária de um dado TC em resposta a uma corrente de curto-circuito para condições com e sem a presença de assimetria. Trata-se de um TC de relação 300-5, 10B100, com carga padrão e uma corrente de falta simétrica de 15 vezes sua corrente primária nominal.



**Figura 2.11 – Resposta da corrente secundária em condições ideais e considerando a saturação: (a) corrente de falta simétrica e (b) mesma corrente de falta, porém com assimetria e relação  $X/R = 20$ .**

A Figura 2.11(a) representa a resposta ideal e real de um TC para as condições mencionadas anteriormente, considerando apenas a simetria na corrente de falta. Observa-se que o TC não satura, e sua corrente primária é refletida no seu secundário com erro insignificante, estando de acordo com as definições mencionadas na seção 2.2.1.

Já a Figura 2.11(b) representa o TC sob as mesmas condições do caso (a), porém considerando a máxima assimetria no curto-circuito e uma relação  $X/R$  igual a 20. Observa-se que a forma de onda tem um elevado grau de assimetria, nos primeiros ciclos, devido ao decaimento exponencial causado pelo *offset dc*.

Tais sinais foram gerados no MATLAB, cuja implementação do algoritmo é discutida no capítulo 4.

### ✓ *Carga (Burden)*

Todos os dispositivos e cabos que se conectam ao TC representam certa carga secundária. Uma vez que todos os dispositivos alimentados por um TC têm suas impedâncias de entrada conectadas em série, a soma de todas elas resultará na carga total do TC.

O efeito do *burden* pode ser entendido analisando o circuito equivalente do TC ilustrado na Figura 2.3. Deste circuito, tem-se que impedância secundária total é:

$$Z_{\text{total}} = Z_s + Z_b \quad (2.22)$$

e que a tensão secundária de excitação é dada por:

$$v_e = Z_{\text{total}} \cdot i_s \quad (2.23)$$

Dessa forma, substituindo a equação (2.23) na equação (2.1), tem-se que:

$$\beta_m = \frac{Z_{\text{total}} \cdot i_s}{4,44 \cdot A \cdot f \cdot N} \quad (2.24)$$

Da equação (2.24) observa-se que quanto menos dispositivos conectados ao secundário do TC, menor será sua carga, e ele trabalhará em um menor nível de densidade de fluxo magnético.

Um TC com elevada carga secundária irá saturar mais rápido do que quando conectado a cargas menores, pois cargas elevadas requerem maior tensão para um determinado valor de corrente. Além disso, cabe mencionar que para duas impedâncias de mesmo valor absoluto, aquela com maior parcela indutiva, ou seja, com menor fator de potência, fará com que o TC sature de forma mais lenta. Assim, o tempo até a saturação é maior do que para cargas puramente resistivas ou com menores parcelas indutivas.

Para assegurar a exatidão, considerando apenas o *burden* na análise, os TCs são especificados com seus valores de carga padrões, como já apresentado na Tabela 2.1.

Na Figura 2.12 pode ser observada a influência do *burden* em um TC 300-5, 10B100, cujo valor padrão, de acordo com a Tabela 2.1, é equivalente a  $R_b = 0,5\Omega$  e  $X_b = 0,866\Omega$ . A Figura 2.12(a) mostra o comportamento da forma de onda secundária para um TC, operando com carga padrão, e exposto a uma corrente de falta simétrica de 10 vezes a corrente primária nominal. Por estar sujeito a uma corrente de falta em níveis aceitáveis e ter carga padrão no seu secundário, o TC reflete a corrente primária no seu secundário sem erros consideráveis. Já na Figura 2.12(b), o TC está sujeito ao mesmo nível de corrente de falta, porém com um *burden* de 5 vezes o valor padrão. Observa-se que a corrente secundária apresenta-se distorcida e com magnitudes reduzidas em decorrência da saturação do TC, podendo comprometer a atuação de um dado relé de proteção associado a ele.

Tais sinais também foram gerados no algoritmo implementado em MATLAB.

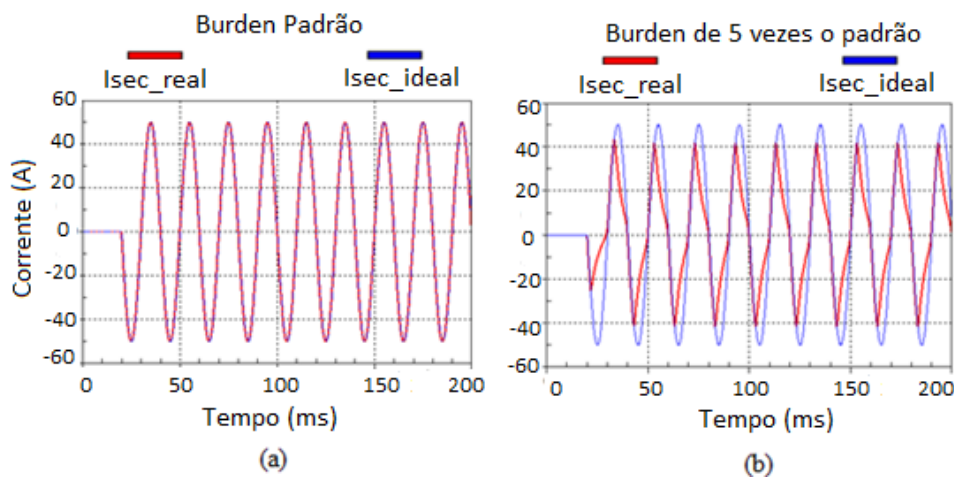


Figura 2.12 – Resposta da corrente secundária em condições ideais e considerando a saturação: (a) *burden* padrão e (b) *burden* de cinco vezes o valor padrão.

### ✓ Fluxo Remanescente

A norma IEEE Std. C37.110 (2007) define o fluxo remanescente, ou residual, como a densidade do fluxo magnético que permanece em um circuito magnético após a remoção de uma força magnetomotriz aplicada. Diz ainda que o fluxo remanescente no núcleo do TC depende do valor do fluxo imediatamente antes da interrupção da corrente primária e que a magnitude do fluxo é determinada pelos



valores da corrente primária simétrica, da componente DC e da impedância do circuito secundário.

O núcleo de um TC pode saturar precocemente para correntes bem abaixo do nível normal devido à existência de fluxo remanescente. Segundo (WARRINGTON, 1978), os materiais utilizados na construção do núcleo dos TCs podem ter remanência elevada de modo que, após um desligamento de um curto severo, o núcleo manterá um fluxo remanescente elevado, durante certo tempo, o suficiente para causar saturação na próxima excursão da corrente na direção de aumento do fluxo total. Segundo dados de fabricantes, o fluxo remanescente pode chegar a 80% do fluxo de saturação.

Esse fluxo remanescente 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. O tempo para o núcleo entrar e sair do regime de saturação, bem como o grau de saturação por componente DC decorrente de uma falta assimétrica, dependerá em larga escala do nível e da polaridade do fluxo remanescente.

Vale mencionar que o fluxo remanescente é um importante fator para casos em que exista religamento automático na rede elétrica.

### 2.2.3.2 Critérios para evitar a saturação de TCs

Se as características dos TCs não forem devidamente selecionadas para condições de falta, seu núcleo poderá saturar e, em consequência disto, a operação dos relés de proteção será afetada.

Mostrou-se nas seções anteriores que as características de desempenho do TC podem ser especificadas pela norma IEEE Std. C57.13 (2008). No entanto, esta norma abrange apenas o comportamento do TC sob regime permanente e em condições de faltas simétricas.

Entretanto, outro documento importante é a norma IEEE Std. C37.110 (2007) a qual trata também da questão da saturação DC e como evitá-la. Segundo esta norma, para evitar a saturação AC, deve-se ter no secundário do TC uma tensão ( $V_s$ ) que seja menor que a tensão de saturação ( $V_x$ ):

$$V_x \geq I_s \cdot Z_s \quad (2.25)$$

onde:  $I_s$  é a corrente eficaz primária dividida pela RTC;

$Z_s$  é a carga secundária total do TC;

$V_x$  é a tensão de saturação do TC.

O valor da tensão secundária ( $V_x$ ) terminal do TC é aquela que o TC vai entregar a uma carga padrão quando a corrente atingir 20 vezes a corrente secundária nominal, chegando próximo ao limite da classe de 10% de erro. Assim sendo, a equação (2.25) pode ser reescrita em p.u. da seguinte forma:

$$20 \geq i_f \cdot z_b \quad (2.26)$$

onde:  $i_f$  é o valor da máxima corrente de falta em p.u. da corrente nominal do TC.

$z_b$  é a carga do TC em p.u. da carga padrão.

Por sua vez, para se evitar a saturação proveniente de uma corrente eficaz assimétrica e com carga puramente resistiva, a norma IEEE Std. C37.110 (2007) sugere que a tensão secundária seja menor que a tensão de saturação ( $V_x$ ), dado agora pela seguinte equação:

$$V_x \geq I_s \cdot Z_s \left( 1 + \frac{X}{R} \right) = V_s \quad (2.27)$$

onde  $X$  e  $R$  representam a reatância e resistência do sistema primário, respectivamente, até o ponto de falta. Esta equação está demonstrada em (ZOCHOLL, 2004).

Se a carga do TC tiver uma parcela indutiva, a tensão de saturação, para a corrente assimétrica, é dada por:

$$V_x \geq I_s \cdot Z_s \left( 1 + \frac{X}{R} \cdot \frac{R_s + R_{burden}}{Z_s} \right) \quad (2.28)$$

Similarmente à saturação AC, a equação (2.27) pode ser reescrita, em p.u., da seguinte forma:

$$20 \geq \left| 1 + \frac{X}{R} \right| i_f \cdot z_b \quad (2.29)$$

A mesma norma também sugere uma equação para evitar a saturação quando da presença de fluxo remanescente na falta assimétrica. Nela, a tensão de saturação é dada por:

$$V_x \geq \left( \frac{I_s \cdot Z_s \left( 1 + \frac{X}{R} \right)}{1 - F_r} \right) \quad (2.30)$$

onde  $F_r$  representa o fluxo remanescente em p.u.

Para (ZOCHOOL, 2004), a equação (2.29) sugere os seguintes procedimentos para seleção do TC para aplicações com relés de proteção:

- Determinar a máxima corrente de falta  $i_f$  em ampères primários;
- Determinar a relação X/R do circuito primário correspondente;
- Selecionar a tensão nominal do TC e em seguida, determinar a carga total em p.u. da carga padrão;
- Usando a equação (2.29), calcular  $i_f$ , que é a corrente de falta em p.u. do valor nominal do TC;
- Dividir a máxima corrente primária de falta  $i_f$  pela corrente em p.u. para determinar a corrente nominal do TC;
- Selecionar o valor nominal padrão mais próximo e maior do que o valor calculado.

Segundo ZOCHOOL (2004), os critérios mencionados anteriormente geralmente são aceitáveis nas aplicações de proteção de linhas, uma vez que as correntes de falta são limitadas de três a cinco vezes a corrente de carga, e raramente ultrapassam dez vezes esta mesma corrente. Sendo assim, a dimensão dos TCs para tais aplicações não seria um fator que inviabilizaria a aplicação destes critérios.

O fato do critério definido na equação (2.29) poder ou não ser atendido depende da relação  $X/R$  e da magnitude da máxima corrente de falta. Um limite para este critério ocorre onde uma máxima corrente de falta, admissível para uma determinada característica nominal do TC, diminui severamente com o aumento da relação  $X/R$ . ZOCHOOL (2004) cita que o limite deste critério pode ser observado, por exemplo, quando uma elevada relação  $X/R$  e uma alta corrente de falta ocorrem próximas a um gerador. Neste caso, torna-se impraticável dimensionar um TC para evitar a saturação durante uma falta assimétrica, utilizando-se o critério apresentado.

A norma IEEE Std. C37.110 (2007) não oferece nenhuma orientação para outras aplicações onde esses critérios não são aplicáveis e viáveis. Além disso, a referida norma não especifica a intensidade da saturação do TC e os seus efeitos sobre os relés de sobrecorrente, os quais estão sujeitos a níveis de curto-circuito bem maiores em determinados sistemas de distribuição, principalmente na presença de geração distribuída. Portanto, esta é uma área ainda nebulosa e negligenciada, para a qual não existem guias de aplicação.

### 2.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados, de forma sucinta, os principais conceitos acerca dos TCs, necessários para o entendimento do fenômeno da saturação, o qual é investigado neste trabalho. Ressalta-se aqui a importância de se conhecer as características do TC, bem como as características do sistema elétrico onde o TC será instalado, de modo a avaliar o comportamento do mesmo durante os transitórios de falta.

## *Capítulo 3*

---

# *O RTDS e a Proteção de Sobrecorrente*

### 3.1 Considerações Iniciais

Um dos métodos utilizados para avaliar a resposta da função de sobrecorrente de um relé de proteção numérico considerando os efeitos da saturação de TCs consiste em simulações utilizando um Simulador Digital em Tempo Real - RTDS (*Real Time Digital Simulator*).

Por essa razão, este capítulo concentra-se em apresentar os conceitos básicos sobre o RTDS e abordar uma breve teoria da proteção de sobrecorrente necessária para o entendimento dos testes que são analisados no capítulo 6.

### 3.2 *Real Time Digital Simulator (RTDS)*

O Simulador Digital em Tempo Real, desenvolvido pelo *RTDS Technologies Inc.*, é um computador especial projetado para estudar fenômenos transitórios eletromagnéticos. Ele consiste em um completo sistema de simulação digital para a realização de testes em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) com capacidade de operação contínua, em tempo real e em malha fechada com equipamentos de proteção e controle.

O RTDS permite que o comportamento dinâmico do sistema seja determinado e que as correntes e tensões em diversas condições de operação sejam aplicadas a um sistema de proteção real. Desta forma, pode-se determinar o desempenho do sistema, bem como detectar possíveis falhas, através do monitoramento da sua resposta em tempo real, que é feita através do *software* do RTDS.

O RTDS vem sendo utilizado em todo o mundo para inúmeras simulações de diversos tipos de sistemas elétricos, desde os mais simples até os mais complexos. Nestes incluem completos sistemas de proteção e controle aplicados a centrais geradoras de energia elétrica, linhas de transmissão, transformadores, motores, compensadores estáticos, plantas industriais, etc. A Figura 3.1 ilustra algumas aplicações do RTDS.

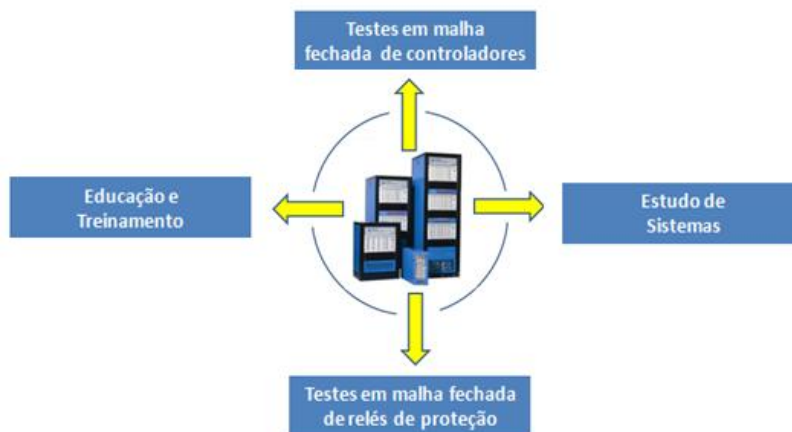


Figura 3.1 – Algumas aplicações do RTDS.

### 3.2.1 Hardware

O *hardware* do RTDS é composto de modernos Processadores de Sinal Digital (DSP) cuja principal vantagem é seu processamento paralelo, permitindo assim obter alta velocidade de computação necessária na operação contínua em tempo real. O *hardware* é montado em unidades modulares, chamados *racks*, que contém cartões com funções específicas. Uma placa de comunicação comum (*backplane*) interliga todos estes cartões, dentro do *rack*, para facilitar o intercâmbio de informações. O RTDS utilizado neste trabalho, ilustrado na Figura 3.2, é constituído por:

- 2 *racks* e 5 cartões *Giga Processor Cards* (GPC) que fornecem a potência computacional para a simulação em tempo real. Os modelos de componentes, solução de rede e etc., são todos resolvidos em placas do processador GPC;
- Cartões GTWIF (*Workstation Interface Card*) para comunicação *intra-racks* bem como comunicação com rede local;
- Cartões de saída e entrada digital: são os cartões GTDI/GTDO (*Gigabit Transceiver Digital Input/Output Card*) que estabelecem interface de sinais digitais (faixa +5 a +24 Volts dc) entre o RTDS e os dispositivos externos;

- Cartões GTFPI (*Inter-Rack Communication Card*) que estabelecem a interface de comunicação entre as entradas e saídas digitais do painel frontal do RTDS e o cartão GPC;
- Cartões de saída e entrada analógica: são os cartões GTAI/GTAO (*Gigabit Transceiver Analogue Input/Output Card*) que estabelecem interface de sinais analógicos (faixa  $\pm 10$  Volts AC) entre o RTDS e dispositivos externos;
- Soluções no domínio do tempo, em tempo real, com um passo típico de integração em torno de  $50 \mu\text{s}$ .

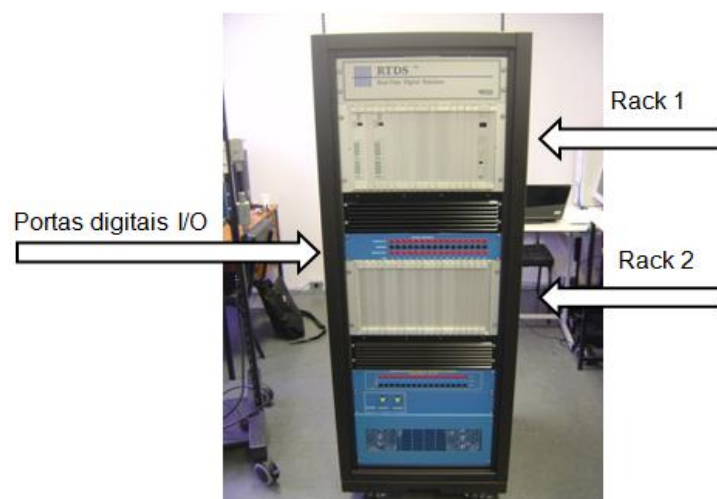


Figura 3.2 - RTDS da Universidade Federal de Itajubá utilizado neste trabalho.

#### 3.2.2 Software

O *software* do RTDS inclui modelos de componentes elétricos precisos, capazes de representar muitos dos elementos complexos que compõem os sistemas de potência reais. A técnica de solução de circuitos empregada é baseada na análise nodal. Os algoritmos utilizados pelo *software* são baseados no trabalho “*Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks*”, de H.W. Dommel. O algoritmo de Dommel é utilizado em praticamente todos os programas de simulação digital criados para o estudo de transitórios eletromagnéticos.



O RSCAD, que é o *software* do RTDS, inclui uma poderosa interface gráfica, através da qual o usuário é capaz de construir, controlar e analisar os casos simulados. Assim, um sistema elétrico a ser simulado pode ser facilmente montado, na forma de circuitos, no RSCAD. Este possui uma biblioteca de modelos de componentes de controle e de um sistema de potência, os quais podem ser manipulados pelo *mouse* do computador, permitindo ao usuário realizar todos os passos necessários para preparar e rodar uma simulação, bem como analisar os dados de saída na forma numérica ou gráfica. Os modelos individuais de cada componente podem ser configurados e conectados entre si para formar o modelo de sistema necessário para o estudo. Os modelos de fontes e geradores operam na frequência real do sistema, assim o simulador inerentemente opera em tempo real.

Uma vez construído o sistema com todos os parâmetros ajustados, um compilador apropriado automaticamente gera o código de baixo nível para realizar a simulação.

O RTDS é ainda uma opção para a realização de simulações *on-line*, podendo um equipamento externo ser controlado ou controlar dispositivos de manobras e/ou componentes dinâmicos representados na simulação digital, realizando, assim, o que comumente é chamado de *Hardware-In-The-Loop (HIL)*.

Neste trabalho, a versão utilizada foi a 2.016 do RSCAD, a qual está instalada em diversos computadores do GQEE. A tela inicial do programa pode ser vista na Figura 3.3.

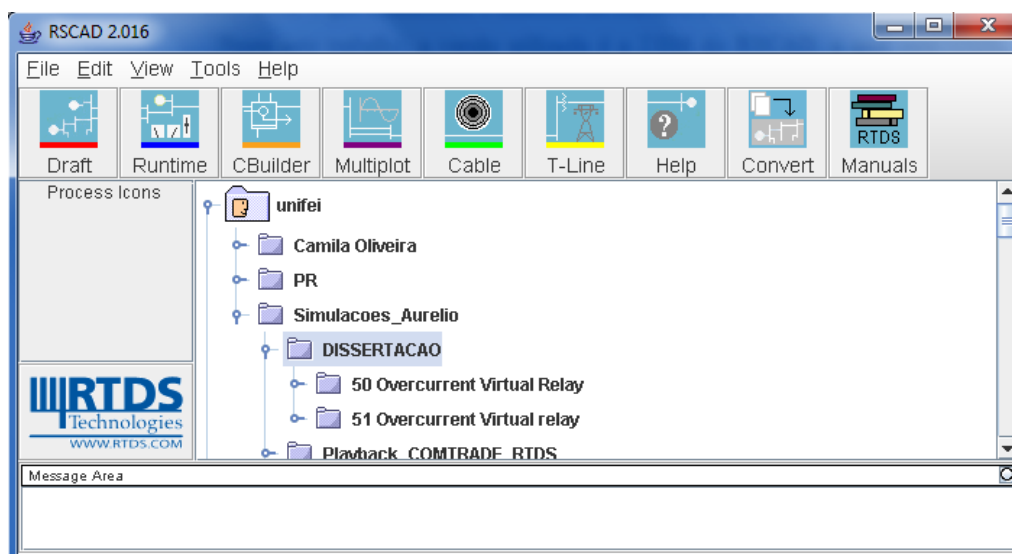


Figura 3.3 – Tela inicial do *software* RSCAD.

Como indicado na Figura 3.3, o RSCAD possui nove módulos:

- *Draft*;
- *RunTime*;
- *CBuilder*;
- *Multiplot*;
- *Cable*;
- *T-Line*;
- *Help*;
- *Convert*;
- *Manuals*.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados apenas três destes módulos. Segue uma breve explicação da utilidade dos mesmos.

#### a) *Draft*

O módulo *Draft* é usado para criar o circuito que será simulado. Para isso existe uma biblioteca de componentes que podem ser escolhidos e ajustados. A janela da biblioteca é composta por abas que contém diferentes grupos de componentes, como ilustrado na Figura 3.4. Na aba *Controls* se encontram os componentes de controle do RSCAD, como funções matemáticas, funções lógicas, componentes de entrada e saída e componentes para processamento de sinais. Na aba *Power System* estão os componentes do sistema elétrico, como fontes, linhas de transmissão, transformadores de instrumentos (TC, TPC, TP), transformadores de potência, cargas, etc.. Além disso, é possível ainda criar bibliotecas novas com componentes específicos.

Ao inserir um componente no seu arquivo, os parâmetros necessários associados a esse modelo podem ser inseridos em uma janela *pop-up*.

Antes que o circuito do usuário seja simulado, o arquivo deve ser compilado, gerando, assim, o arquivo código exigido pelo RTDS para executar a simulação. Se não houver erros ou avisos gerados pelo processo de compilação, a mensagem "*Compile completed successfully*" será exibida na área de avisos. Se o processo de

## Capítulo 3 – O RTDS e a Proteção de Sobrecorrente

compilação gerar um erro, será aberta uma janela onde serão listadas as mensagens de erro.

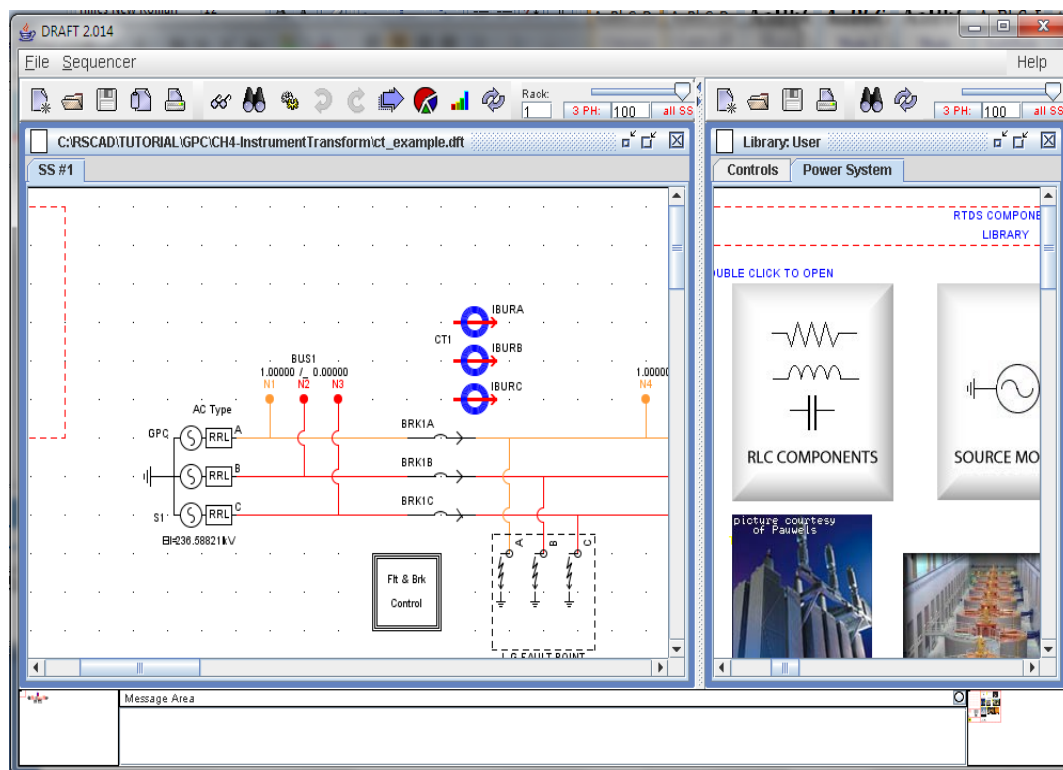


Figura 3.4 – Tela inicial do módulo *Draft* e biblioteca (*Library*).

### b) *RunTime*

Os casos são simulados no RTDS a partir do módulo *RunTime*. Todo arquivo gerado pelo *RunTime* (extensão *.sib*) está relacionado a um arquivo gerado pelo *Draft* (extensão *.dft*), estando os dois se comunicando através das variáveis do circuito criado, como tensões, correntes, variáveis de controle e de acionamentos e relações de transformação. Na tela do *RunTime* é possível criar *sliders*, *plots*, *buttons*, *switches*, etc., todos com a finalidade de monitorar o comportamento das variáveis do circuito. Deste modo, a tela é customizável para cada simulação.

A Figura 3.5 ilustra um exemplo rodado no *RunTime*. A coluna de ícones do lado direito da tela (*Scan*) indica a disponibilidade dos *racks*.

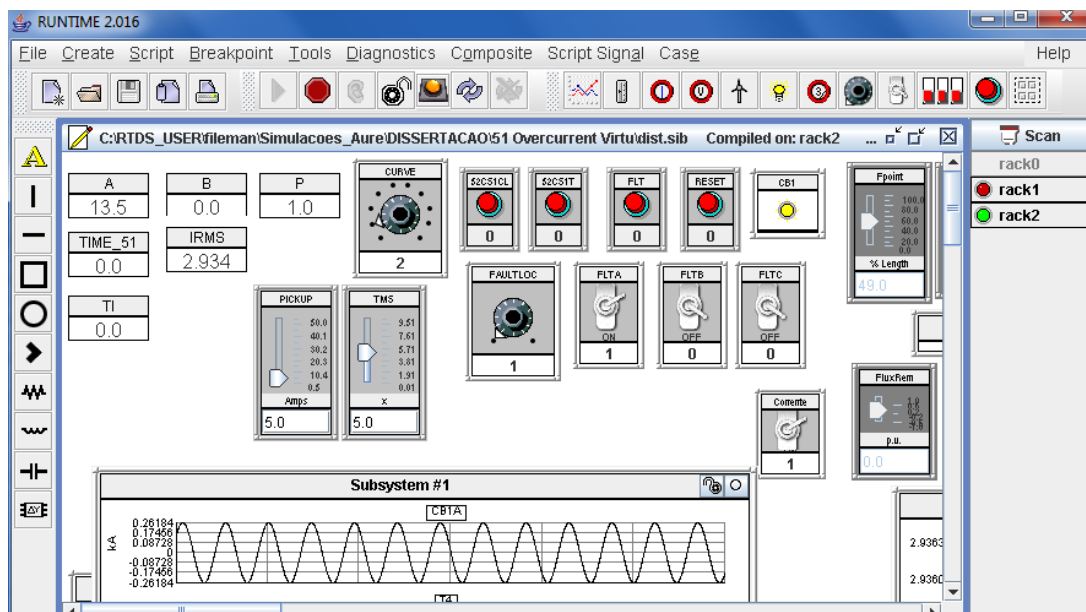


Figura 3.5 – Exemplo de tela inicial do módulo *RunTime*.

### c) *Manuals*

O próprio *software* RSCAD já possui um módulo que chama o manual do programa em sua tela inicial, o módulo *Manuals*. A tela inicial deste manual é composta pelos seguintes itens:

- *Hardware*;
- *Data Conversion Program*;
- *Component Builder*;
- *Component Builder Tutorial*;
- *VSC Small Time-Step Modeling*;
- *Tutorial*;
- *Power System Components*;
- *Control System Components*.

Este manual representou a grande fonte de consulta para este trabalho no que se refere ao tema RTDS, pois se trata de uma tecnologia relativamente nova e bem cara, cuja quantidade de pesquisas na área está crescendo aos poucos. Os itens mais explorados foram os três últimos listados acima.

### 3.2.3 Modelos dos componentes básicos de um SEP

Diferentes modelos de elementos de um sistema de potência podem ser encontrados. A seguir alguns destes elementos são mostrados, para fins didáticos.

#### a) *Source Model*

Esse componente é utilizado para representar uma fonte de tensão. No sistema implementado a fonte escolhida é uma fonte trifásica, como indicada na Figura 3.6. Para parametrizar este modelo são necessários os dados de impedância de sequência positiva e nula, tipo de onda a ser gerada, representação de impedâncias (R, R-L, L), valores iniciais, etc. Podem ainda ser acrescentados até quatro harmônicos à tensão fundamental gerada pela fonte.

Embora os parâmetros de sequência positiva e zero não possam ser alterados dinamicamente durante a simulação, outras quantidades podem variar. Todos os modelos de fontes disponíveis permitem a variação dinâmica da magnitude da tensão, e até mesmo da sua frequência e ângulo, usando *sliders* criados no arquivo do *RunTime*.

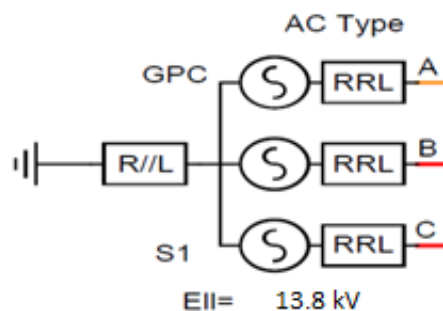
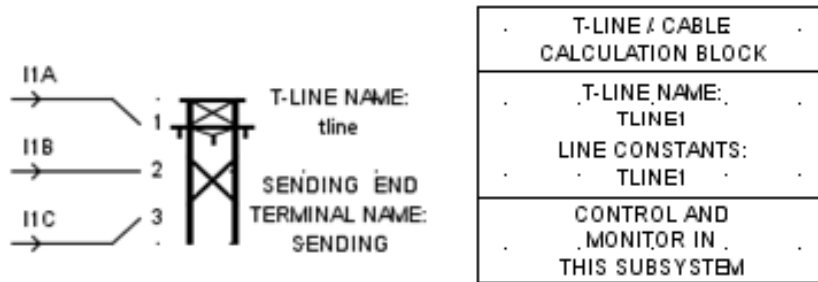


Figura 3.6 – Modelo de fonte do RSCAD (Bloco *Source*).

#### b) *T-Line Model e Line Calculation Block*

Estes blocos são usados para simular uma linha de transmissão trifásica desde que a mesma não represente uma linha curta, quando deve ser utilizado o modelo PI. Para usá-los na interface de modelagem, outro arquivo com as especificações da linha deve ser criado através do módulo especial chamado *T-Line*.

Com esses dois blocos é possível controlar as correntes e o fluxo de potência na linha, acrescentar disjuntores e reatores, bem como criar outras dinâmicas. A forma como a linha é representada no *Draft* é ilustrada na Figura 3.7.



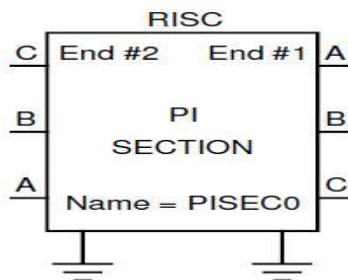
**Figura 3.7 – Modelo de Linha de Transmissão no RSCAD (Blocos *T-Line Model* e *Line Calculation Block*).**

Uma vez que a modelagem de linhas de transmissão é de extrema importância quando se estuda fenômenos transitórios, os modelos oferecidos pelo RSCAD para tais elementos são bastante precisos.

Neste trabalho não foi utilizado nenhum modelo de linha de transmissão.

**c) *PI Section***

Este bloco, cujo modelo é ilustrado na Figura 3.8, é usado na representação de linhas curtas ou ainda para os casos de linhas longas onde o tempo de viagem é menor do que o tempo de simulação. A representação dos parâmetros se dá de forma concentrada, exatamente nos valores atribuídos de R e L.



**Figura 3.8 – Bloco *PI Section*.**

d) *L-G Fault Point e L-L Fault Point*

Com esses dois blocos é possível simular faltas de todos os tipos ao longo do sistema, sendo o *L-G Fault Point* usado para faltas fase-terra e o *L-L Fault Point* para faltas fase-fase. É possível controlar as resistências de falta e dar nome as variáveis que controlarão a ocorrência das mesmas. Um exemplo destes blocos é representado na Figura 3.9.

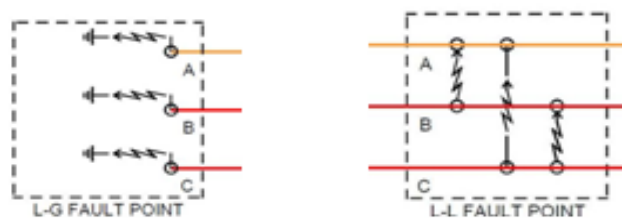


Figura 3.9 – Blocos *L-G Fault Point* e *L-L Fault Point*.

e) *3 Phase Breaker*

Esse componente é utilizado para simular chaves ou disjuntores, ver Figura 3.10. Através dele ainda é possível fazer o monitoramento da corrente que o atravessa.

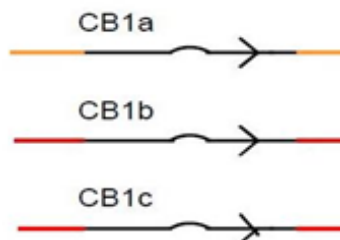


Figura 3.10 – Bloco que representa os disjuntores no RSCAD (*3 Phase Breaker*).

f) *Current Transformer*

O TC é comumente usado para alimentar relés de proteção ou instrumentos de medição de corrente, onde o sistema primário pode conter centenas ou milhares de ampères, enquanto o relé ou um medidor possui um nível de entrada típico de alguns ampères.

Para o RTDS, o TC é um dispositivo auxiliar que relaciona as correntes do sistema simulado, transformando-as em valores secundários, aplicando-as ao modelo do dispositivo, seja este virtual (modelado no próprio *Draft*) ou real, como um relé de proteção externo ao RTDS. Neste caso, necessita-se externar tal sinal através das saídas analógicas, nas quais estão ainda ligados amplificadores, conforme mostrado no capítulo 5. Os valores secundários dos TCs podem ser facilmente monitorados, assim como todas as outras variáveis do sistema. O bloco do modelo de TC do RSCAD utilizado neste trabalho e seu correspondente circuito equivalente são apresentados na Figura 3.11.

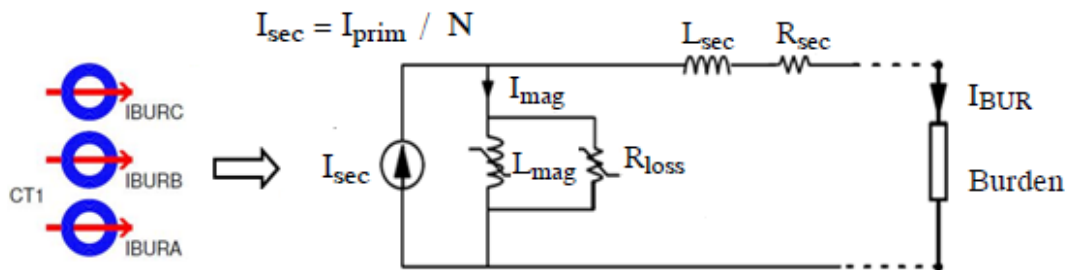


Figura 3.11 – Bloco de um TC no RSCAD e seu respectivo circuito equivalente.

Os parâmetros do modelo de TC do RSCAD, representado no circuito equivalente da Figura 3.11, tais como a relação de espiras ( $N$ ), a resistência e indutância do enrolamento secundário ( $R_{sec}$  e  $L_{sec}$ ), a impedância do *burden* e as perdas no núcleo ( $R_{loss}$ ) podem ser atribuídas pelo usuário conforme a análise a ser realizada.

#### 3.2.4 Aplicações na Área de Proteção de um SEP

O RTDS permite a configuração de sistemas de potência com vários tipos de elementos possíveis, como elos de corrente contínua, compensações séries fixas, compensadores síncronos e até cargas desequilibradas, como por exemplo, grandes fornos a arco de siderúrgicas. As simulações têm sido aplicadas não somente para sistemas de potência, mas também em grandes plantas industriais onde existam várias cargas equilibradas e desequilibradas, existindo a necessidade de analisar os efeitos destas em dispositivos de proteção e controle.



A garantia de que a ferramenta irá gerar os resultados mais próximos da realidade está na grande capacidade de modelagem dos componentes, realizada através da inserção correta dos dados no sistema de simulação que se deseja avaliar.

O uso do RTDS vem se tornando essencial em pesquisas na área de proteção pelo fato dele permitir a realização de ensaios de modelos onde são simulados vários tipos de faltas para serem injetadas aos relés em tempo real. Desta forma, o ajuste do relé pode ser exaustivamente testado para cada condição de falta do sistema, gerando assim otimizações e correções na parametrização do mesmo e fazendo com que o sistema atenda plenamente aos requisitos de proteção.

### 3.3 Proteção de Sobrecorrente

Como é bem conhecido da literatura, um relé de sobrecorrente pode ser do tipo instantâneo (função ANSI 50) ou do tipo temporizado (função ANSI 51), podendo este último ser de tempo definido ou de tempo inverso. Enfoque é dado ao relé de tempo inverso por ser o mais utilizado na prática.

Para qualquer destas características ele tem seu funcionamento baseado na verificação do nível do sinal de corrente na sua entrada, seja através de uma bobina principal (caso dos relés eletromecânicos), ou em um circuito condicionador e amostrador (caso de relés numéricos).

O relé de sobrecorrente do tipo instantâneo, de tecnologia eletromecânica, é sensibilizado pelo maior valor presente na forma de onda da corrente de curto-circuito, ou seja, o primeiro pico, no período subtransitório, considerando-se a assimetria da falta. Tal corrente irá proporcionar um torque instantâneo positivo que, estando acima de um determinado limiar estabelecido pelo ajuste da corrente de *pick-up*, o relé fechará um contato, significando um comando de desligamento (*trip*) ao disjuntor correspondente.

Com as novas tecnologias numéricas, os algoritmos são baseados na extração de informações da corrente de entrada como, por exemplo, a derivada da corrente no primeiro ciclo de falta ou o valor *rms* do período subtransitório assimétrico do curto-circuito.

Por sua vez, um relé do tipo temporizado (tempo inverso) tem seu tempo de atuação (fechamento de seu contato principal ou envio de informação de desligamento) baseado em uma curva de tempo pertencente à uma família de curvas de tempo inversa, conforme mostra a Figura 3.12.

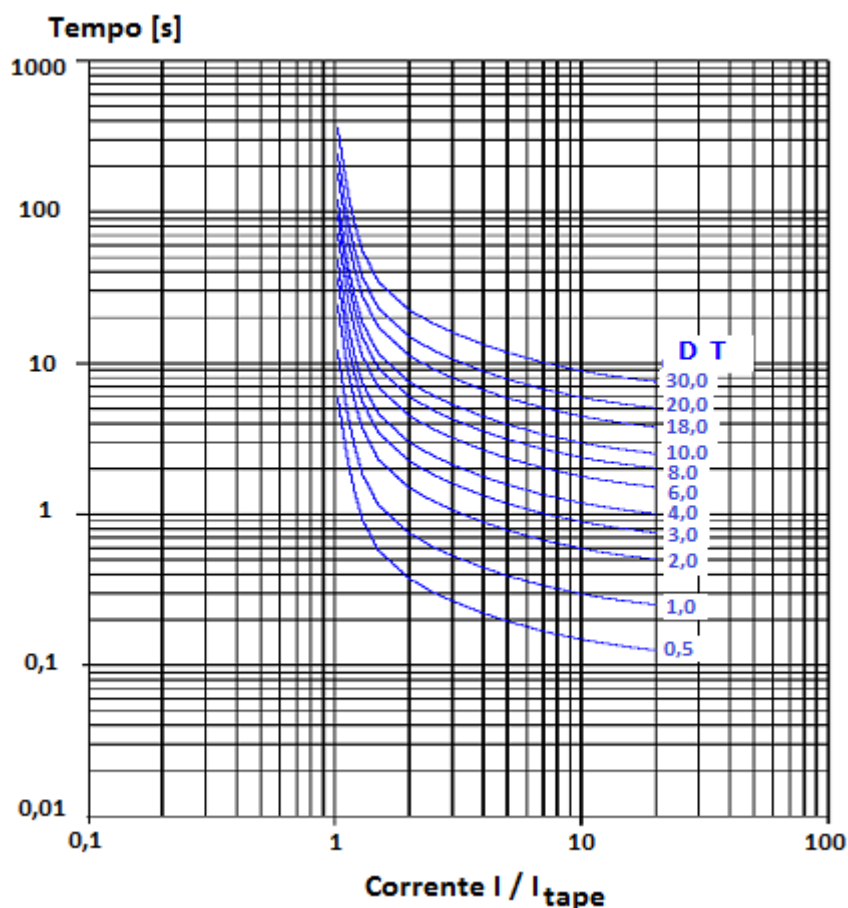


Figura 3.12 – Curvas características do relé de sobrecorrente de tempo inverso.

Nos relés eletromecânicos estas curvas são intrínsecas à própria tecnologia e a escolha de uma delas se faz através de um *dial* de tempo (DT). Todas as curvas são dependentes da corrente de partida (*pick-up*), cujo valor é a própria corrente nominal do tape de entrada, a ser ajustado pelo usuário. Assim, por exemplo, uma corrente de 50 A passando em um tape de 5 A, terá como múltiplo um valor de 10 e irá, para este múltiplo, operar em um tempo de 0,3 segundos, caso o DT esteja em 2.

No caso de relés numéricos as curvas de tempo inverso são padronizadas por normas internacionais e podem ser representadas matematicamente. Dentre as diferentes curvas padronizadas, as mais usuais são as do tipo:

$$t = \left( \frac{k \cdot k_d}{M^n - 1} \right) \quad (3.1)$$

sendo,

$$M = \frac{I_{\text{atual}}}{I_{\text{pickup}}} \quad (3.2)$$

onde:

$I_{\text{atual}}$  é a corrente secundária do TC que alimenta o relé;

$I_{\text{pickup}}$  é a corrente de partida do relé, ajustada em função da corrente nominal do relé.

Os demais parâmetros da equação são elementos que definem uma família de curvas, conforme a Tabela 3.1 extraída da norma IEC 60255 (1989).

**Tabela 3.1 – Valores dos parâmetros de ajuste para as curvas IEC.**

Curvas	Descrição IEC 60255	k	n
C1	<i>IEC Standard Inverse</i>	0,140	0,020
C2	<i>IEC Very Inverse</i>	13,500	1,000
C3	<i>IEC Extremely Inverse</i>	80,000	2,000
C4	<i>IEC Long-Time Inverse</i>	120,000	1,000
C5	<i>IEC Short-Time Inverse</i>	0,050	0,040

Finalmente o parâmetro  $k_d$  tem o mesmo significado que o DT nos relés eletromecânicos, assumindo valores normalmente entre 0,05 a 1 em valores contínuos, e cuja escolha define uma única curva de uma determinada família de curvas. Cabe mencionar que toda a parametrização é realizada via *software*, podendo ser inseridos os valores desejados, para a função de proteção específica, através de uma interface disponibilizada pelo programa do fabricante do relé ou mesmo através do próprio teclado e *display* em seu painel.

A escolha de um determinado ajuste para um relé depende dos estudos de seletividade e coordenação. Na prática, a unidade instantânea deverá operar para a falta mais próxima, desde que seu valor ultrapasse o ajuste especificado. Por outro lado, a unidade temporizada é utilizada normalmente como elemento de retaguarda da proteção principal, conforme representado no esquema da Figura 3.13.

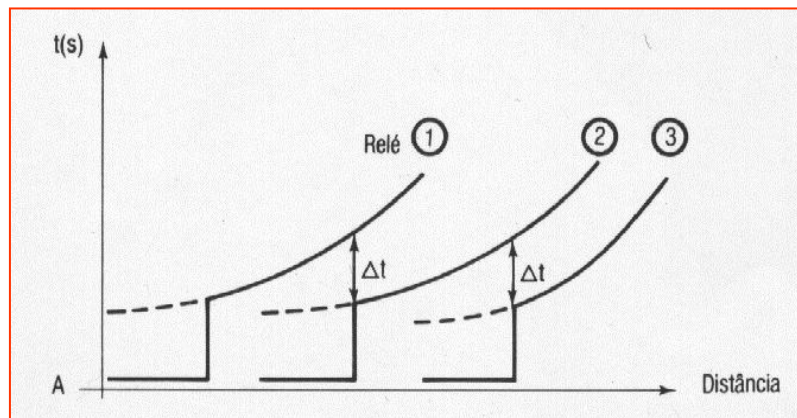


Figura 3.13 – Coordenação entre as proteções instantânea e temporizada.

### 3.4 Considerações Finais

Foram apresentados, neste capítulo, os principais conceitos sobre o RTDS e uma breve teoria a cerca da proteção de sobrecorrente necessária para o entendimento deste trabalho.

Ficará demonstrada, em capítulos subsequentes, a importância de se fazer a modelagem de sistemas e de seus componentes para testes em tempo real. Um deles é a verificação do comportamento dos relés numéricos de sobrecorrente frente às formas de onda distorcidas.

*O Modelo IEEE PSRC  
implementado em MATLAB*

## 4.1 Considerações Iniciais

Para investigar a resposta da função de sobrecorrente de um relé de proteção numérico sob a influência da saturação de TCs, um dos métodos utilizados neste trabalho faz uso de modernas caixas (marca OMICRON) para testes em relés de proteção.

A diferença em relação a outros testes convencionais é que, para este desenvolvimento, os dados da forma de onda das correntes são obtidos inicialmente em MATLAB, através de um modelo matemático de TC, baseado na teoria publicada pelo *IEEE PSRC* por (SWIFT, 2001). O algoritmo implementado no MATLAB serve, por sua vez, para modelar variados tipos de TCs convencionais, considerando todos os fatores que podem causar a sua saturação, extraindo-se, como resultado, a forma de onda secundária.

Na sequência, estes dados de corrente secundária, do TC modelado, são convertidos em arquivos de formato COMTRADE, de modo que uma caixa OMICRON de teste possa ler tais arquivos e convertê-los em um sinal real, na amplitude desejada.

## 4.2 O Modelo de TC *IEEE PSRC*

O modelo de TC proposto pelo *IEEE PSRC* (SWIFT, 2001) destina-se a fornecer uma indicação rápida, não só da existência de saturação do TC em uma aplicação específica, mas também uma indicação precisa da forma de onda real da corrente secundária, de modo que o grau de saturação em função do tempo fique evidenciado.

Uma das dificuldades na utilização de um modelo elaborado está na obtenção dos parâmetros para cada caso particular, a fim de implementar esse modelo com facilidade, eficiência e precisão. Por exemplo, a corrente de excitação na região abaixo do ponto do joelho é uma combinação complexa de magnetização, histerese e elementos das correntes de Foucault, parâmetros estes que geralmente não são conhecidos em um caso particular.

Acontece que, se a forma de onda da corrente de excitação atinge a região saturada, a porção da forma de onda na região abaixo do ponto de joelho tem um efeito insignificante sobre a solução global. Para (SWIFT, 2001), isto simplifica bastante a solução, com pouco efeito na precisão.

Portanto, levando em consideração tal fato, as perdas por histerese e por correntes de Foucault não são consideradas no modelo implementado. Em casos em que se deseja avaliar os erros em baixa corrente, onde as condições de baixa carga são de interesse, um modelo mais elaborado deve ser utilizado, o que não é o interesse deste trabalho.

### 4.2.1 Circuito equivalente do modelo

O circuito equivalente do TC que irá gerar todo modelo matemático (suas equações e condições de contorno) para obtenção das correntes resultantes no algoritmo implementado em MATLAB, é representado na Figura 4.1.

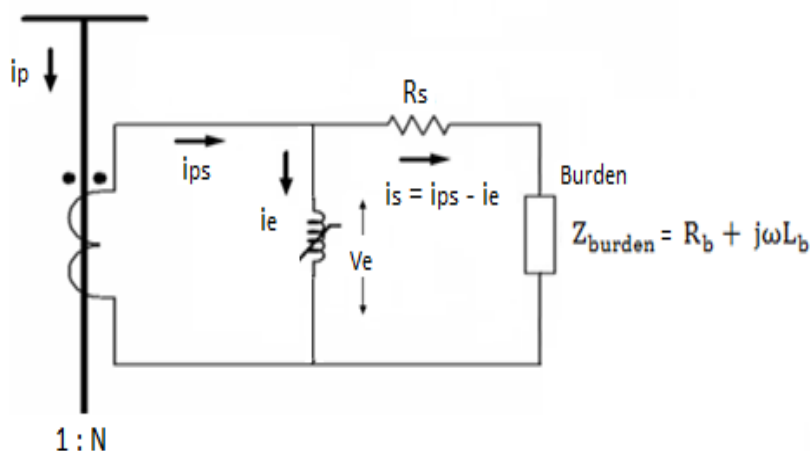


Figura 4.1 - Circuito equivalente do modelo de TC *IEEE PSRC*.

Os parâmetros representados no circuito da Figura 4.1 são:

- $i_p$  – Corrente primária instantânea;
- $i_{ps}$  – Corrente secundária ideal instantânea;
- $i_s$  – Corrente secundária real instantânea;
- $i_e$  – Corrente de excitação instantânea;

- $v_e$  – Tensão de excitação instantânea;
- $R_s$  – Resistência do enrolamento secundário;
- $R_b$  – Resistência do *burden*;
- $L_b$  – Indutância do *burden*;
- $N$  – Número de espiras do TC;
- $\omega$  – Frequência angular em radianos por segundo;

Através da Lei de Kirchhoff das tensões, o circuito representado na Figura 4.1 é descrito pela equação dada por:

$$v_e - (i_{ps} - i_e) R_t - L_b \cdot \frac{d}{dt} (i_{ps} - i_e) = 0 \quad (4.1)$$

onde  $R_t$  representa a resistência total no secundário do TC, ou seja: resistência do *burden* mais a resistência do enrolamento secundário.

Considerando o circuito da Figura 4.1 sob condições de falta dada pela equação 2.13, a corrente secundária ideal do TC ( $i_{ps}$ ), supondo  $i_e = 0$ , tem sua simetria e/ou assimetria expressas pela equação dada por:

$$i_{ps}(t) = \frac{I_p}{N} \sqrt{2} [K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} - \cos(\omega t - \cos^{-1}K)] \quad (4.2)$$

onde  $I_p$  é a corrente de falta simétrica *rms* e  $K$  o fator que determina as características da forma de onda da corrente secundária, ou seja:

- i)  $K = 1$ , quando existir componente assimétrica na corrente de falta. Neste caso  $\tau = \frac{1}{X/R}$  é a constante de tempo do sistema sob falta;
- ii)  $K = 0$ , quando houver somente componente simétrica na corrente de falta.

O capítulo 2 mostra que, na prática, a corrente de excitação não é zero e que sua magnitude determina o quanto a corrente primária está sendo refletida erroneamente no secundário do TC. Portanto, similarmente a equação (2.5), a corrente secundária real em função do tempo é representada por:



$$i_s(t) = i_{ps}(t) - i_e(t) \quad (4.3)$$

Assim, a equação (4.3) deve ser trabalhada para se determinar a corrente de excitação em função do tempo.

## 4.2.2 Modelagem implementada

A curva que relaciona a tensão secundária de excitação e a corrente de excitação em valores *rms*, apresentada na seção 2.2.3 é usada neste modelo.

Contudo, para simplificação, apenas dois parâmetros precisam ser extraídos da curva de excitação: (i) a inclinação (*slope* - *S*) da seção saturada da curva de magnetização e, (ii) a tensão de saturação ( $V_x$ ) onde a corrente de excitação é 10 (dez) ampères. A Figura 4.2 ilustra a situação.

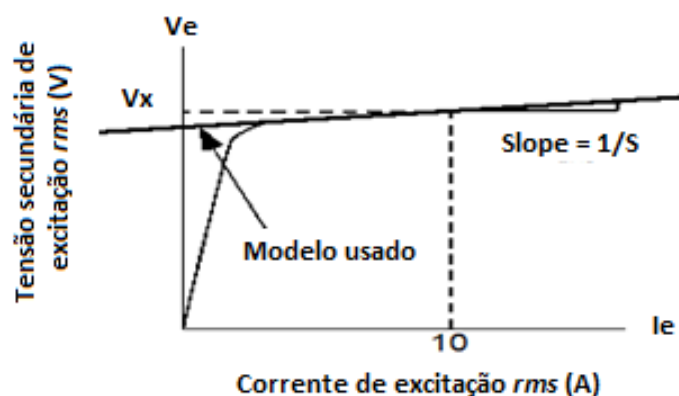


Figura 4.2 - Curva de excitação do modelo de TC *IEEE PSRC*.

Fonte: Figura adaptada de (SWIFT, 2001).

A razão para a escolha da tensão de saturação no ponto onde a corrente de excitação é 10 A *rms* é definida na norma IEEE Std. C57.13 (2008). Conforme equação (2.9), esses 10 A são equivalentes a um erro de 10% para uma corrente de 20 vezes a corrente secundária de 5 A.

A “reta” em linha contínua com inclinação  $1/S$  mostrado na Figura 4.2 é representada em escala logarítmica pela equação:

$$\log V_e = \frac{1}{S} \log I_e + \log V_i \quad (4.4)$$

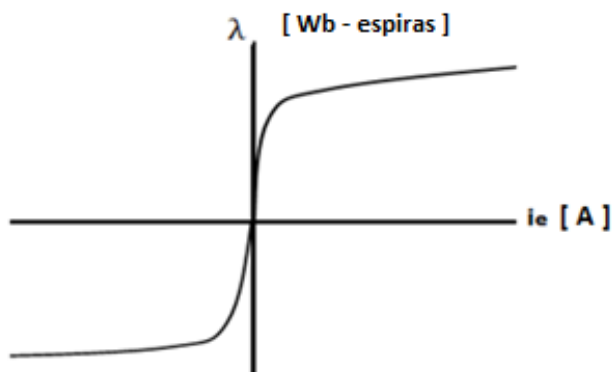
onde  $V_i$  é o valor de  $V_e$  para  $I_e = 1$  e, conseqüentemente,  $\log I_e = 0$ . Removendo os logaritmos da equação (4.4) obtém-se, em valores *rms*, a equação dada por:

$$V_e = V_i I_e^{1/S} \quad (4.5)$$

Neste modelo, uma curva fluxo ( $\lambda$ ) versus corrente de excitação ( $i_e$ ), como a representada na Figura 4.3, foi utilizada para resolver as equações diferenciais implícitas do circuito representado na Figura 4.1. Esta curva é definida pela equação:

$$i_e = A|\lambda|^S \quad (4.6)$$

onde "A" é uma constante do modelo definida por parâmetros conhecidos que são mostrados na sequência.



**Figura 4.3 - Curva fluxo versus corrente de excitação usada no modelo.**

Pela Lei de Faraday, o fluxo ( $\lambda$ ) está relacionado com a tensão de excitação instantânea ( $V_e$ ), de modo que:

$$v_e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (4.7)$$

Por sua vez, a curva de excitação é obtida a partir de uma tensão de excitação senoidal, dada por:

$$v_e = \sqrt{2} V_e \cos(\omega t) \quad (4.8)$$

o que implica que seus fluxos ( $\lambda$ ) serão também senoidais. Combinando as equações (4.7) e (4.8) obtém-se então:

$$\lambda = \int v_e dt = \int \sqrt{2} V_e \cos(\omega t) dt = \frac{\sqrt{2} V_e}{\omega} \text{sen}(\omega t) \quad (4.9)$$

Já a corrente de excitação não é senoidal, uma vez que é uma função de ordem  $S$  do fluxo  $\lambda$ . Substituindo a equação (4.9) na equação (4.6), obtém-se:

$$i_e = A|\lambda|^S = A\left[\frac{\sqrt{2} V_e}{\omega} \text{sen}(\omega t)\right]^S = A\left[\frac{\sqrt{2} V_e}{\omega}\right]^S \text{sen}^S(\omega t) \quad (4.10)$$

Considerando que o valor *rms* da corrente de excitação é, por definição, dado por:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_e^2 dt} \quad (4.11)$$

Pode-se então combinar as equações (4.10) e (4.11) para se obter:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} A^2 \left[\frac{\sqrt{2} V_e}{\omega}\right]^{2S} \text{sen}^{2S}(\omega t) dt} = A \left[\frac{\sqrt{2} V_e}{\omega}\right]^S \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{sen}^{2S}(\omega t) dt} \quad (4.12)$$

A razão entre os valores *rms* e de pico de um sinal senoidal é dado por  $\sqrt{2}$ . Como neste modelo a corrente de excitação não é senoidal, essa razão, denominada de fator RP neste texto, é expressa por:

$$RP = \frac{I_e}{i_{e \text{ pico}}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (i_{e \text{ pico}})^2 \text{sen}^{2S}(\omega t) dt}}{i_{e \text{ pico}}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{sen}^{2S}(\omega t) dt} \quad (4.13)$$

A integral definida na equação (4.13), que determina o valor de RP, é implementada computacionalmente utilizando o método trapezoidal para um particular valor de S (*slope*), parâmetro este que pode ser ajustado pelo usuário do modelo matemático-computacional.

Observa-se que o valor de RP dado na equação (4.13) corresponde a uma parte da expressão que define o valor *rms* da corrente de excitação expressa pela equação (4.12). Associando estas equações, chega-se a conclusão que:

$$I_e = A \left[ \frac{\sqrt{2} V_e}{\omega} \right]^S \cdot RP \quad (4.14)$$

Mostrou-se anteriormente que na curva de excitação do modelo, representada na Figura 4.2, a tensão  $V_e$  para uma corrente de excitação *rms* no valor de 10A, passa a ser a tensão  $V_x$ . Assim sendo, para este particular ponto da curva, a equação (4.14) pode ser reescrita como:

$$10 = A \left[ \frac{\sqrt{2} V_x}{\omega} \right]^S \cdot RP \quad (4.15)$$

podendo, a partir desta equação, se definir a constante “A” do modelo, ou seja:

$$A = \frac{10\omega^S}{(\sqrt{2} V_x)^S} \cdot \frac{1}{RP} \quad (4.16)$$

Pela equação (4.6) vê-se que a corrente de excitação é dada em função desta constante “A”. Deste modo, combinando as equações (4.16) e (4.6), a corrente de excitação passa a ser definida por:

$$i_e = \frac{10\omega^S}{(\sqrt{2} V_x)^S} \cdot \frac{1}{RP} |\lambda|^S \quad (4.17)$$

Nota-se na equação (4.17) que, para avaliar os efeitos da corrente de excitação na saturação do TC, é necessário determinar o fluxo ( $\lambda$ ). Para uma implementação computacional, este fluxo pode ser calculado em função da sua

variação ( $\Delta\lambda$ ) ao longo do tempo, bem como do fluxo remanescente ( $\lambda_{rem}$ ), quando houver, multiplicado pelo valor de pico do fluxo ( $\lambda_{sat}$ ) no ponto de saturação. Portanto, em termos matemáticos, isso significa:

$$\lambda = (\lambda_{sat} * \lambda_{rem}) + \Delta\lambda \quad (4.18)$$

O valor de pico do fluxo no ponto de saturação, neste modelo, é definido no ponto em que a corrente de excitação é 10A, ou seja, onde a tensão de excitação ( $V_e$ ) corresponde à tensão de saturação ( $V_x$ ). Assim, pela equação (4.9), tem-se:

$$\lambda_{sat} = \frac{\sqrt{2} V_x}{\omega} \quad (4.19)$$

Já a variação do fluxo é obtida a partir da derivada da corrente de excitação em função do tempo, presente na equação (4.1). Esta, por sua vez, pode ser decomposta, a partir da regra da cadeia, em:

$$\frac{di_e}{dt} = \frac{di_e}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dt} \quad (4.20)$$

Considerando a equação (4.6), tem-se a derivada da corrente de excitação em função do fluxo, ou seja:

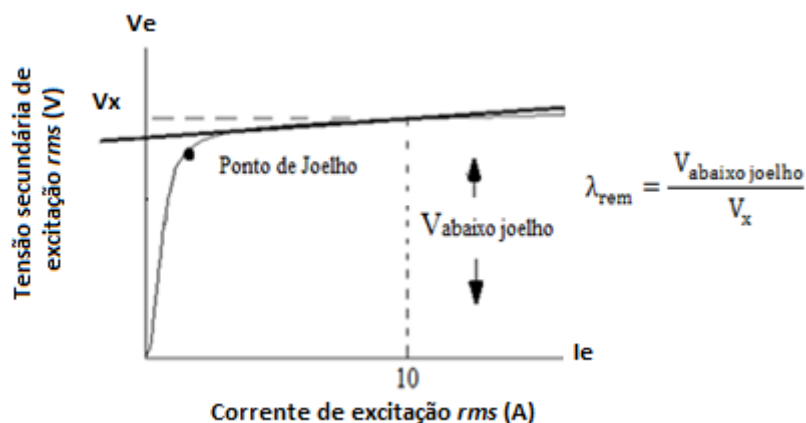
$$\frac{di_e}{d\lambda} = A \cdot S \cdot |\lambda|^{S-1} \quad (4.21)$$

Dessa forma, substituindo os valores das equações (4.7), (4.20) e (4.21) na equação (4.1) e manipulando-as, a variação do fluxo é expressa em função do tempo por:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \Delta\lambda = \frac{-R_t i_e + R_t i_{ps} + L_b \frac{di_{ps}}{dt}}{1 + L_b A S |\lambda|^{S-1}} \quad (4.22)$$

onde  $\left(\frac{di_{ps}}{dt}\right)$  é definida a partir da derivada da corrente secundária ideal ( $i_{ps}$ ) expressa na equação (4.2).

Por último, o fluxo remanescente ( $\lambda_{rem}$ ) também é inserido no modelo. Seu valor é definido em p.u., como a relação de uma tensão abaixo do ponto de Joelho pela tensão de saturação ( $V_x$ ), conforme representado na Figura 4.4. Este valor, em p.u., pode ser ajustado pelo usuário do modelo, com valores típicos na faixa de 0,1 a 0,8 p.u.



**Figura 4.4 - Determinação do fluxo remanescente do modelo de TC proposto pelo *IEEE PSRC*.**

Definidas as componentes do fluxo e seus efeitos na corrente de excitação, torna-se possível obter a forma de onda da corrente secundária (próxima da real) em função do tempo frente ao fenômeno da saturação do TC, utilizando-se para isto a expressão (4.3).

Baseado em todo equacionamento apresentado, uma rotina computacional foi implementada no MATLAB, com o objetivo de facilitar a obtenção de formas de onda de corrente secundária para diferentes tipos de TCs e diferentes características de corrente primária.

### **4.2.3 Dados de entrada e resultados**

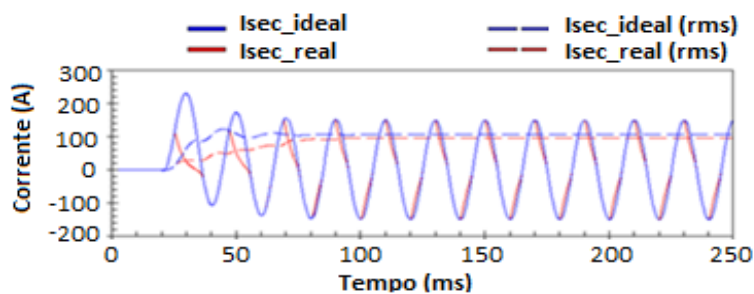
Para que o algoritmo implementado possa resolver todas as equações detalhadas nesta seção, os seguintes dados de entrada do programa devem ser fornecidos pelo usuário:

- (i) o valor da corrente de falta simétrica *rms* ( $I_p$ );
- (ii) a presença ou não de assimetria ( $K$ ) na corrente de falta;
- (iii) a relação  $X/R$  do sistema até o ponto de falta no caso de assimetria;
- (iv) os valores da resistência ( $R_b$ ) e indutância do *burden* ( $L_b$ );
- (v) a resistência do enrolamento secundário ( $R_s$ );
- (vi) a relação de espiras ( $N$ );
- (vii) a tensão de saturação ( $V_x$ );
- (viii) a inclinação (*slope* –  $S$ ) da região saturada da curva de excitação;
- (ix) a presença ou não do fluxo remanescente ( $\lambda_{rem}$ ), com seu valor em p.u.

Com todas as corretas informações, o programa implementado irá fornecer como resultado a forma de onda da corrente secundária ideal (TC não saturado) e da corrente real (TC sob os efeitos da saturação). Além disso, os valores *rms* destes sinais também são calculados, utilizando, para isto, a Transformada Discreta de Fourier (DFT).

Para exemplificar a aplicação desta rotina, as Figuras 4.5 e 4.6 apresentam casos com as formas de ondas resultantes para determinados valores ajustados.

**Valores ajustados:** TC 300-5; 10B100;  $N=60$ ; *Burden* padrão ( $R_b = 0,5$  OHM e  $X_b = 0,866$  OHM)  
 $V_x=100V$ ;  $R_s = 0,15$  OHM;  $S=22$  (*slope*);  $I_p = 30 \times I_{nom}$ ;  $X/R = 5$ ; Flux rem = 0;



**Valores ajustados:** TC 300-5; 10B100;  $N=60$ ; *Burden* = 5 x padrão; Flux rem = 0;  
 $V_x=100V$ ;  $R_s = 0,15$  OHM;  $S=22$  (*slope*);  $I_p = 30 \times I_{nom}$ ;  $X/R = 10$

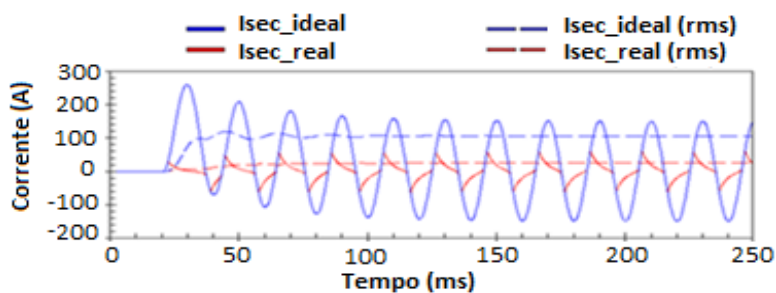


Figura 4.5 – Sinais resultantes do algoritmo implementado em MATLAB: casos com assimetria e *burden* elevados.

O exemplo ilustrado na Figura 4.5 representa os sinais resultantes para um caso com pequena assimetria ( $X/R=5$ ) e outro com decaimento exponencial mais lento ( $X/R=10$ ). Observa-se que no segundo caso a forma de onda ficou severamente deformada em virtude do *burden* acima do padrão associado à elevada magnitude da corrente de falta.

Outra análise que pode ser feita pelo algoritmo implementado em MATLAB é a verificação da influência do tipo de carga na saturação do TC. A Figura 4.6 ilustra duas formas de ondas sob as mesmas condições, porém uma com carga puramente resistiva e outra com indutiva, ambas com valores duas vezes acima do padrão. Conforme esperado, observa-se que o sinal com carga puramente resistiva (fator de potência = 1) apresentou uma deformação mais acentuada, visto que o valor de *burden* padrão para este tipo de TC é especificado para um fator de potência de 0,5 (ver Tabela 2.1).

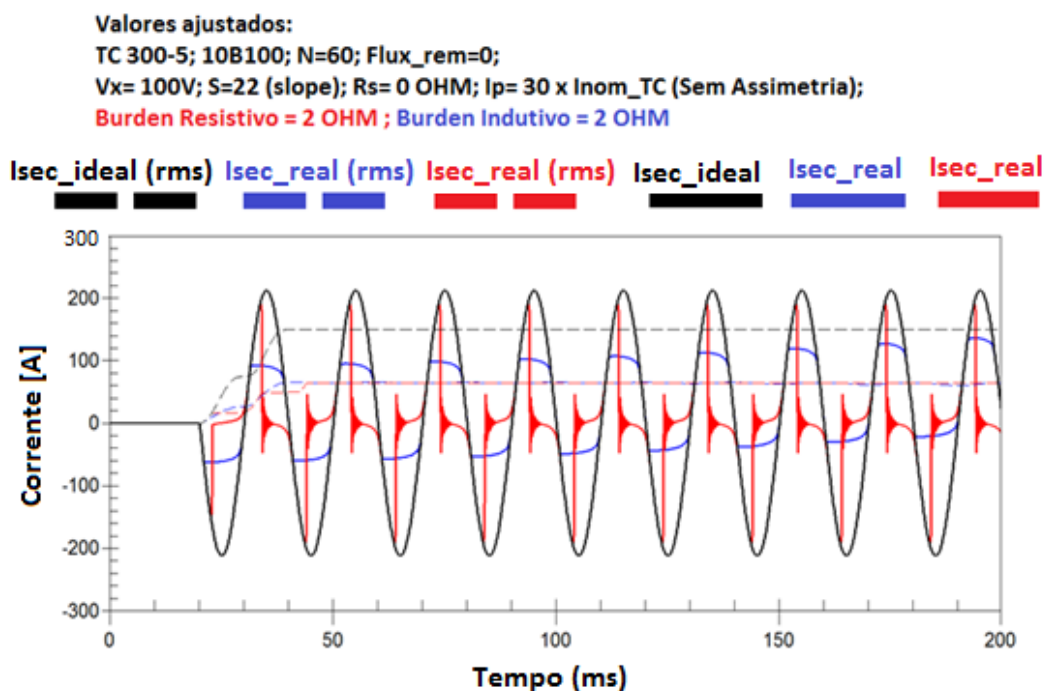


Figura 4.6 – Sinais resultantes do algoritmo implementado em MATLAB: carga puramente resistiva e carga puramente indutiva.

Cabe aqui uma importante observação: é possível ajustar o número de pontos por ciclo (taxa de amostragem) do sinal resultante, bem como o número de ciclos



desejado. O valor padrão adotado neste trabalho é de 200 amostras por ciclo por 120 ciclos (2 segundos).

A implementação desta rotina em MATLAB, por si só, já é uma importante contribuição deste trabalho, pois trata-se de uma ferramenta muito útil para que o usuário de um TC possa conhecer de forma rápida qual é a resposta dinâmica do mesmo, frente à uma forma de onda primária. Mediante este conhecimento, pode-se então fazer diferentes análises relacionadas às especificações da carga (*burden*), da corrente nominal e das características desejadas do núcleo (curva de saturação). Tal abordagem é minuciosamente discutida no capítulo 6.

Como etapa final da utilização da rotina no MATLAB, o usuário possui a opção de salvar as formas de onda obtidas em formato COMTRADE. Desse modo, estes arquivos poderão ser usados em um equipamento de teste, o qual irá transformar os dados digitais em valores analógicos reais de corrente, com a mesma forma de onda. Estas podem ser então injetadas em dispositivos de proteção para análise da resposta dinâmica do relé. No caso deste trabalho isto foi feito com um relé de sobrecorrente numérico comercial, cujos detalhes do sistema de teste são mostrados no capítulo 5.

### 4.3 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado todo o equacionamento matemático utilizado na implementação de um algoritmo em MATLAB, baseado na teoria publicada pelo *Power System Relaying Committee* (PSRC) por (SWIFT, 2001), do qual são obtidos sinais secundários de um TC para análise de saturação. Cabe enfatizar que os resultados obtidos comprovam comportamentos encontrados na literatura como, por exemplo, as diferentes formas de onda para diferentes tipos de carga secundária.

## *Capítulo 5*

---

### *Sistemas de Testes*

## 5.1 Considerações Iniciais

Testes e ensaios em relés de proteção são convencionalmente realizados por caixas de testes, que, quando programadas, injetam um dado valor de corrente para avaliar a resposta estática destes dispositivos. Algumas destas caixas são provedoras de ferramentas que reproduzem sinais transitórios, em formato COMTRADE, importados de outras fontes, sejam de registradores digitais de perturbação (RDPs) ou de programas de transitórios eletromagnéticos.

Neste trabalho, os dados da corrente secundária, do TC modelado matematicamente no MATLAB no capítulo anterior, são convertidos em arquivos de formato COMTRADE, de modo que uma caixa de teste possa ler tais arquivos e convertê-los em um sinal real, na amplitude desejada. Foi utilizada a caixa de teste OMICRON para a reprodução de sinais de corrente em formato COMTRADE e injeção destes sinais em um relé numérico.

Além da utilização de caixas de teste, outro método também foi empregado para avaliar a saturação de um TC e sua influência em um relé numérico. Este segundo método é baseado na utilização do RTDS através de simulação em malha fechada. Os mesmos tipos de TC que o usuário ajusta no algoritmo implementado em MATLAB podem ser reproduzidos em um modelo existente no RTDS.

Cabe enfatizar que o objetivo primário deste segundo método é validar os modelos do MATLAB, de modo que se possa obter formas de ondas semelhantes tanto em um modelo quanto em outro. No caso do RTDS, o mesmo relé de proteção é instalado como um *Hardware-In-The-Loop* (HIL) e testado via Simulação em Tempo Real.

A seguir os dois sistemas de testes mencionados anteriormente são descritos com detalhes.

## 5.2 Arquitetura do sistema de teste utilizando os dados COMTRADE

Uma caixa de teste OMICRON 256-6 (OMICRON, 2007) foi utilizada para injetar os dados, em formato COMTRADE, dos sinais da corrente secundária ideal e real, obtidos das equações (4.2) e (4.3) respectivamente.

A ferramenta *Advanced Transplay* do software *Omicron Test Universe* foi utilizada para importar estes dados COMTRADE. Para a aplicação pretendida, um relé de proteção numérico, o SEL 351-S, fabricado pela SEL (*Schweitzer Engineering Laboratories*, 2007), foi utilizado com o objetivo de avaliar a sua função de sobrecorrente em decorrência dos efeitos da saturação do TC presente nos sinais escolhidos.

A arquitetura deste sistema de teste é apresentada na Figura 5.1.

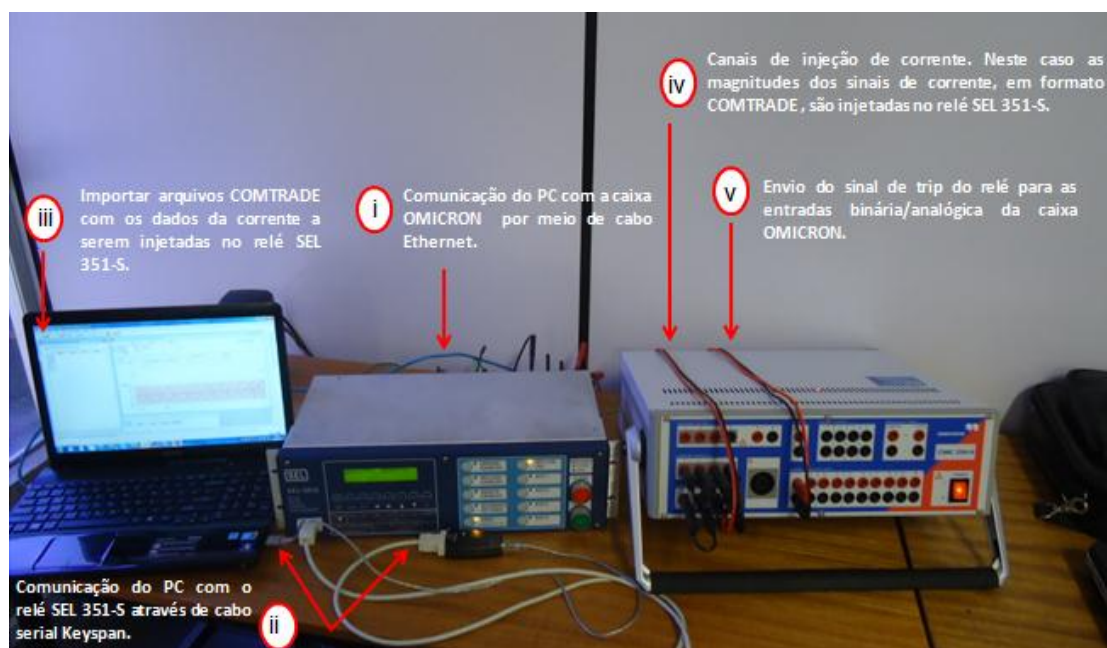


Figura 5.1 - Arquitetura do sistema de teste baseado no uso do equipamento de injeção de corrente.

De acordo com a Figura 5.1, a utilização deste sistema de teste segue, de forma geral, os seguintes procedimentos:

- i) Para estabelecer a comunicação entre a caixa de teste OMICRON 256-6 e o PC, um cabo *ethernet* é utilizado. A comunicação é reconhecida através do *software Omicron Test Universe*;
- ii) A parametrização e os ajustes do relé SEL 351-S são realizados a partir do computador (PC) pelo *software AcSELerator QuickSet*. A comunicação entre o PC e o relé é realizada através de um cabo serial *Keyspan*;
- iii) Os arquivos COMTRADE gerados (sinais da corrente secundária do TC), cujo modelo matemático foi implementado em MATLAB, são importados para o *software Omicron Test Universe* a partir da ferramenta *Advanced Transplay*;
- iv) Antes de reproduzir o sinal de corrente, é necessária a configuração da caixa OMICRON, no *software Advanced Transplay*, quanto às informações relativas ao dispositivo sob teste, neste caso o relé SEL351-S, além dos canais de corrente utilizados de acordo com as conexões físicas entre os contatos. Neste caso, são utilizados apenas dois canais: fase A e neutro. Neste arranjo, a caixa OMICRON pode amplificar o sinal até o valor de 75 A, sendo este o máximo valor possível de corrente a ser injetado no relé, dentre as combinações de canais possíveis deste equipamento. Para realizar testes com valores secundários acima de 75 A, a amplitude do sinal deve ser dividida por dez no programa. Para que a amplitude real deste sinal seja “vista” pelo relé, a RTC a ser ajustada no relé deve ser multiplicada por dez. Dessa forma, para que o relé opere corretamente, o *pickup* deve ser também dividido por dez. Verificada essas condições, a corrente pode ser injetada no relé;
- v) O sinal de trip do relé SEL 351-S, em resposta aos sinais injetados nos testes, é enviado para as entradas binária/analógica da caixa OMICRON, a fim de registrar o tempo do comando de *trip* na ferramenta *Advanced Transplay*.

Seguindo todos os passos, diversos testes para avaliar a influência da saturação na resposta da função de sobrecorrente do relé SEL 351-S foram realizados. Os resultados destes testes são apresentados no capítulo 6.

### 5.3 Sistema de testes de relés baseado em simulação HIL pelo RTDS

Diferentemente do procedimento apresentado na seção anterior, na utilização do RTDS não houve a necessidade de modelar matematicamente um TC. Foi utilizado um modelo de TC próprio do RTDS, onde seus parâmetros são ajustados através do *Draft* do *software* RSCAD. Além disso, a injeção da corrente no relé de sobrecorrente é feita através de amplificadores de corrente, ligados às saídas analógicas do RTDS.

Para tal, um sistema de distribuição foi modelado no RTDS. Neste sistema de distribuição um modelo de TC também foi inserido, sendo os sinais secundários externados pelas saídas analógicas do RTDS, amplificados e injetados no relé numérico SEL 351-S. Este por sua vez tem seu canal de comando de desligamento do disjuntor (*trip*) ligado ao RTDS, desempenhando assim um *Hardware-In-The-Loop*.

Os fatores que influenciam a saturação do TC, descritos na seção 2.2.3.1, foram considerados no modelo de TC já existente no RSCAD, o *software* do RTDS. O intuito é gerar formas de ondas similares ao do MATLAB, com três objetivos: (i) familiarizar-se com os modelos do RTDS, (ii) validar os dados do MATLAB e (iii) analisar também o desempenho da proteção sob diversos eventos. Os resultados também são apresentados no capítulo 6.

As informações mais relevantes quanto à arquitetura deste método empregado são apresentadas nas subseções seguintes.

### 5.3.1 O sistema de distribuição analisado no RTDS

Para a proposta deste trabalho, um pequeno sistema de distribuição foi modelado no RSCAD a partir de componentes da biblioteca do seu *Draft*, como representado na Figura 5.2. Este sistema é composto por:

- Uma fonte de 13,8 kV, que representa a alimentação do circuito, e sua respectiva impedância;
- Dois barramentos: um de referência e outro de carga;
- Uma impedância RL, representando a carga equivalente;
- Um disjuntor utilizado para realizar manobras na ocorrência de faltas;
- Um TC usado para captar as correntes do sistema simulado e enviá-las ao relé de proteção sob avaliação.

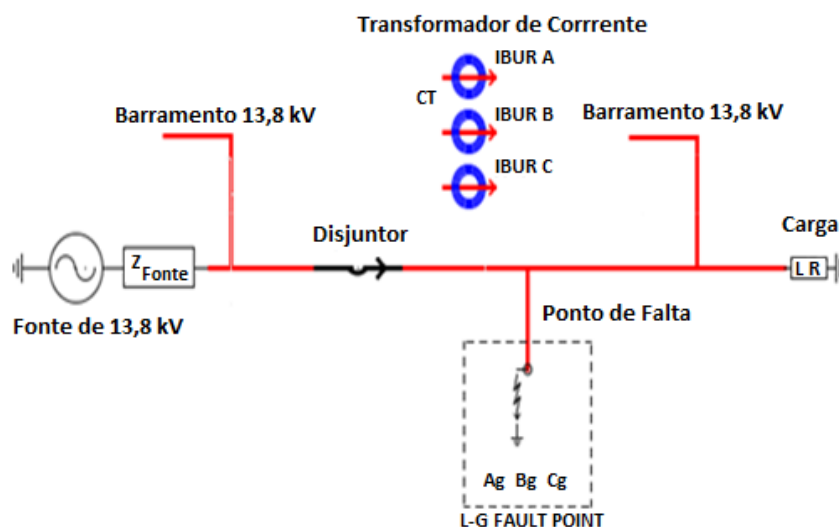


Figura 5.2 - O sistema de distribuição equivalente monofásico modelado no RSCAD.

O modelo de TC do RSCAD utilizado neste sistema é um modelo o mais próximo possível de um TC real. No caso deste trabalho ele é usado apenas para reproduzir em seu secundário as correntes primárias. Assim, o desempenho do TC poderá ser analisado a partir das correntes secundárias, tanto no *RunTime*, quanto nos sinais externados pelas saídas analógicas.

A parametrização do TC, com suas características nominais, foi baseada na corrente nominal do sistema de distribuição em questão. A obtenção desta corrente se deu a partir da análise do circuito elétrico, representado na Figura 5.2,

considerando os dados da impedância dos componentes e da tensão do sistema. Estes dados, bem como as características do TC utilizado, estão contidos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Dados dos componentes utilizados no sistema de distribuição modelado no RSCAD.

Sistema de Distribuição			Dados do TC 300-5A (Classe 10B100)		
Impedância da Fonte de 13,8 kV ( $\Omega$ )	Impedância da carga ( $\Omega$ )	Corrente Nominal (A)	RTC	Burden Padrão ( $\Omega$ )	Tensão secundária (V)
0,1745 + j 4,997 5 88°	5 + j 37,699 38,02 82,445°	262,038 pico 185,28 rms	60	0,5 + j 0,866 1 60°	100

Os parâmetros do TC podem ser facilmente inseridos no RTDS, como ilustrado na Figura 5.3.

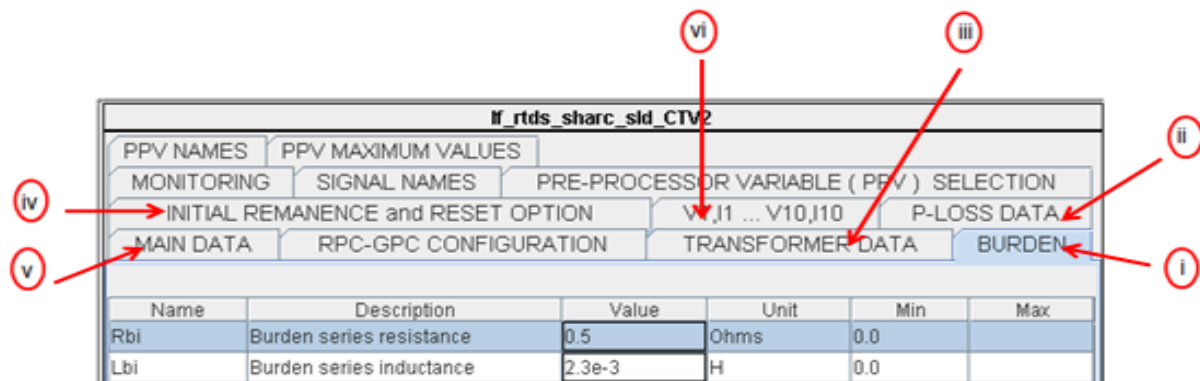


Figura 5.3 - Definição dos parâmetros do TC no *Draft* do RSCAD.

De acordo com a indicação desta figura, não necessariamente nessa ordem, a parametrização do TC segue os seguintes passos:

- i) No campo *BURDEN* os valores da carga do TC são inicialmente inseridos com valores padrões e em alguns casos são variados para analisar sua contribuição na saturação do TC;
- ii) Diferentemente do modelo matemático do TC implementado em MATLAB, as perdas por Histerese e Correntes de Foucault podem ser



consideradas no modelo do RSCAD no campo *P-LOSS DATA*. Para fins de comparação neste texto, estes dados não foram considerados;

- iii) No campo TRANSFORMER DATA são inseridos os valores da RTC e da resistência do enrolamento secundário, levando em conta os valores definidos na norma IEEE Std. C57.13 (2008);
- iv) Neste campo são atribuídos os valores para o fluxo remanescente (em p.u.) nos casos onde é necessário analisar a influência da remanência na saturação do TC;
- v) No campo MAIN DATA devem ser definidas: a corrente de entrada do TC que, neste caso, corresponde à corrente primária do sistema de distribuição modelado no *Draft*; a frequência do sistema; a forma para representação da curva de excitação do TC ( $V_{rms}$  x  $I_{rms}$  ou B x H). Neste estudo foi utilizada a curva  $V_{rms}$  x  $I_{rms}$  com o intuito de aproximar do modelo de TC implementado em MATLAB que utiliza os dados de tensão e corrente no ponto de saturação da curva de excitação;
- vi) Por fim, neste campo deve-se entrar com os dados ( $V_{rms}$  x  $I_{rms}$ ) da curva de excitação do TC. No modelo de TC do RSCAD é possível entrar com dez pontos da curva de excitação. Neste caso, estes pontos foram coletados da curva representada na Figura 2.4 para um TC de relação 300-5A.

Na Figura 5.2 observa-se o ponto onde são aplicadas as faltas no sistema de distribuição modelado no RSCAD. Para verificar a influência da corrente de falta na saturação do TC um diagrama de controle adaptado para as necessidades do estudo em questão é utilizado. Neste esquema, é possível escolher o tipo de falta (monofásica ou entre fases) e o tempo de duração da mesma. Além disso, neste diagrama de controle é possível definir o ângulo no momento da ocorrência da falta caracterizando, dessa forma, a simetria e/ou assimetria na corrente de curto-circuito,

seguindo os mesmos conceitos abordados no Capítulo 2. Para exemplos mostrados neste texto, foram aplicadas somente faltas monofásicas na fase A.

Para analisar a contribuição da magnitude da corrente de falta na saturação do TC, o módulo da impedância da fonte é variado. Já para avaliar o grau de influência da relação X/R do sistema, quando da presença de assimetria na corrente de curto-circuito, deve-se variar o ângulo da impedância da fonte. Como as faltas são aplicadas nas proximidades do gerador, as outras impedâncias do sistema não necessitam de ajustes porque estão à jusante da ocorrência e não influenciarão no valor X/R da corrente de curto-circuito.

Seguindo assim todos os passos apresentados anteriormente, diferentes testes foram realizados com um relé numérico ligado em malha fechada no RTDS, considerando os efeitos da saturação do TC ajustado no RSCAD.

### 5.3.2 Arquitetura do sistema de testes baseado em simulação HIL

O RTDS é uma opção para a realização de simulações *on-line*, podendo equipamentos externos, tais como relés, controlar dispositivos e comandar equipamentos de manobra (disjuntores e seccionadoras) representados na simulação digital (RTDS, 2009).

Na simulação HIL, componentes secundários, como os dispositivos eletrônicos inteligentes (relés, controladores, etc.) são usados de modo a desempenharem uma malha fechada. Neste estudo, o relé SEL 351-S foi utilizado e sua resposta foi avaliada frente aos sinais de correntes secundários coletados.

A Figura 5.4 mostra o esquema da simulação HIL utilizado neste trabalho para a realização dos testes. Os sinais da corrente secundária do TC do sistema de distribuição modelado no RSCAD são externados por conversores Digital/Analógico (D/A) do RTDS. Para extrair esses sinais para o relé sob teste, o cartão GTAO foi utilizado. Neste cartão, a forma de onda da corrente secundária é reproduzida em valores proporcionais de tensão entre  $\pm 10$  Volts alternados. Portanto, este cartão suporta sinais de baixo nível. Por essa razão, um amplificador OMICRON 156, com capacidade de amplificar correntes até 75A (uma fase), foi usado, considerando-se a necessidade de avaliar a influência de sinais (saturados ou não) de elevada magnitudes no relé de proteção. Observa-se, portanto, que as saídas do amplificador

(sinais analógicos) são então conectadas às entradas do relé. Este, por sua vez, será sensibilizado pela corrente secundária proveniente do sistema simulado no RSCAD e, no caso de alguma falta, o relé deverá enviar um sinal de *trip* para o disjuntor que compõe o sistema de distribuição simulado no RSCAD, interrompendo assim a progressão da falta. Este sinal de *trip* do relé é enviado para as portas de entradas digitais do RTDS. Neste estudo, esta função foi desempenhada pelo cartão GTFPI.

Foi utilizado um temporizador da biblioteca do RSCAD para computar o tempo correspondente ao intervalo do instante da aplicação da falta até a abertura do disjuntor virtual comandada pelo sinal de *trip* enviado pelo relé sob teste.

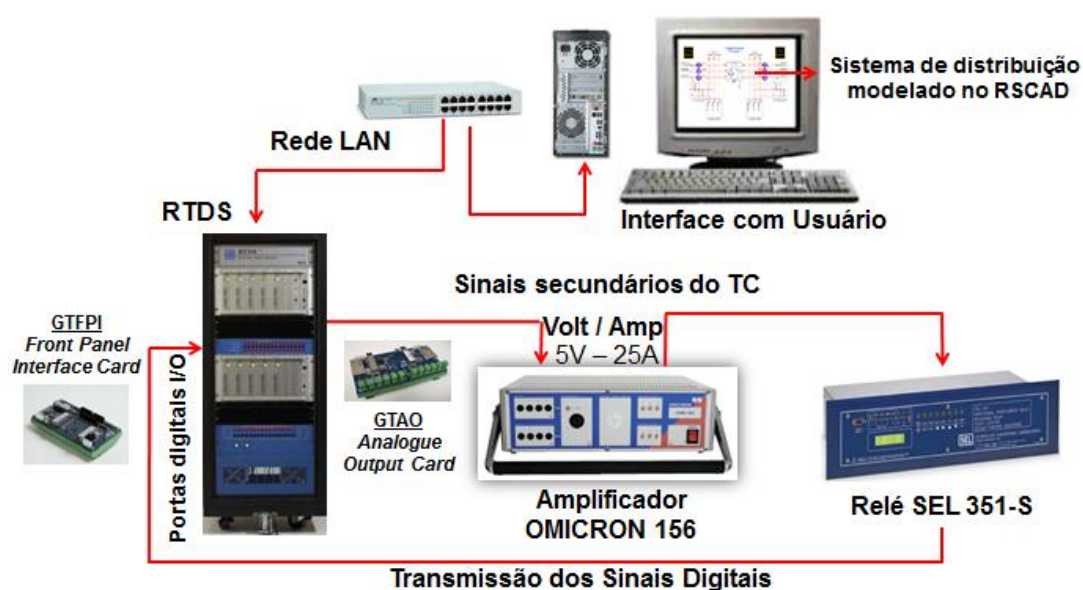


Figura 5.4 - Esquema *Hardware-In-The-Loop* utilizado para testes no relé SEL 351-S.

## 5.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas as duas metodologias utilizadas para testar um relé numérico, considerando os efeitos da saturação de um TC. A primeira é baseada no uso de malas de testes que injetam a corrente no relé a partir de dados COMTRADE, carregados de um algoritmo implementado em MATLAB, que representam os sinais secundários de um TC. O outro método aqui tratado, se baseia na utilização de um TC da biblioteca do RSCAD, inserido em um sistema de distribuição, cujos sinais são injetados no relé e sua resposta avaliada através de simulação HIL.

## *Capítulo 6*

---

### *Resultados e Discussões*

## 6.1 Considerações Iniciais

A aplicação das duas metodologias de testes descritas em capítulos anteriores foram na prática realizadas nas dependências laboratoriais do Grupo de Estudos em Qualidade da Energia Elétrica (GQEE). A infraestrutura existente permitiu, assim, a obtenção das respostas das funções de proteção de sobrecorrente instantânea (50) e temporizada inversa (51) de um relé numérico comercial exposto a sinais de corrente originados de um TC sob o efeito da saturação. Neste estudo de investigação, os seguintes fatores de influência foram analisados:

- Corrente de falta simétrica e *burden*;
- Corrente de falta com assimetria e relação X/R;
- Fluxo remanescente.

Para examinar estes itens, foi utilizado um TC com as características mencionadas e justificadas no capítulo 5 (TC 300-5, 10B100), para ambas as metodologias.

Esta etapa de obtenção de resultados foi então dividida em duas sub-etapas:

(i) Utilização da caixa de testes OMICRON para injetar no relé numérico as formas de ondas de corrente, provenientes do programa implementado no MATLAB. Sinais de corrente, sem distorção e com distorção, em formato COMTRADE são armazenados e usados pela caixa OMICRON. O relé testado comanda o desligamento do sinal injetado pela caixa, contabilizando-se assim o seu tempo de operação;

(ii) Utilização do RTDS para rodar diferentes casos de um sistema de distribuição com um modelo de TC próprio do RSCAD. Sinais oriundos deste modelo virtual de TC são lidos pelo mesmo relé do caso anterior, através de um amplificador de corrente. O relé envia comando de desligamento da falta, contabilizando-se assim o tempo de atuação.

Todos os testes são realizados com o objetivo de comparar os resultados em termos das formas de ondas resultantes (MATLAB e RTDS), bem como avaliar os atrasos na operação do relé testado.

### 6.2 Efeitos da falta simétrica e do *burden* na resposta da proteção de sobrecorrente

Primeiramente, procurou-se verificar os efeitos da carga secundária e da magnitude da corrente de falta simétrica na saturação do TC.

Com relação à carga (*burden*), como apresentado no Capítulo 2, elevados valores conectados no secundário do TC resultarão no aumento da saturação do núcleo e, conseqüentemente, causarão erros na corrente refletida no seu secundário. A razão para isto é que uma dada corrente secundária requer maior tensão do TC para um aumento no valor do *burden*, sendo a densidade de fluxo proporcional a esta tensão (conforme equação 2.24). Cabe enfatizar que na prática, todos os dispositivos e cabos que se conectam ao TC totalizam o *burden* secundário.

Já com relação à corrente de falta, ela será totalmente simétrica quando o ângulo de incidência de falta no sinal de tensão coincidir com a corrente passando por zero. Teoricamente, em um circuito puramente indutivo, esta condição ocorre quando a tensão for máxima, ou seja, ângulo da tensão igual a 90°.

Conforme já comentado, as normas sugerem que os TCs usados com relés de proteção sejam selecionados considerando que a máxima corrente de falta simétrica não exceda 20 vezes a corrente nominal do TC e que a tensão na carga não exceda a tensão da sua classe de exatidão. Caso tal recomendação não possa ser praticada, o núcleo entrará na região de saturação e, quanto mais saturado, maior será a parcela da corrente primária passando pelo ramo de excitação, resultando em uma corrente secundária bem distorcida e indesejavelmente reduzida com relação à corrente primária.

Para mostrar os efeitos das duas variáveis, magnitude da falta AC e carga secundária, na saturação do TC, seis casos foram selecionados, como indicado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Casos simulados para verificar a influência da carga (*burden*) e da corrente de falta simétrica na saturação do TC.

Caso	Múltiplo da corrente primária do TC (300A)	Múltiplo do <i>burden</i> padrão do TC ( $Z_{burden} = 0,5 + 0,866 \Omega$ )	Critério IEEE Equação (2.26) $20 \geq i_f \cdot z_b$
1	7,5	5	$20 < 37.5$
2	7,5	10	$20 < 75$
3	20	1	$20 \geq 20$
4	20	3	$20 < 60$
5	30	1	$20 < 30$
6	60	1	$20 < 60$

Pelo critério IEEE Std. C37.110 (2007) definido na equação (2.26), com exceção do caso 3, houve saturação do TC nos casos apresentados na Tabela 6.1. No caso 3, a corrente de falta está dentro dos limites determinados e foi utilizado um *burden* padrão com valor igual ou menor que o especificado e, por essa razão o TC não entra em regime de saturação.

A Figura 6.1 apresenta os sinais secundários ideais e reais, resultantes do modelo implementado em MATLAB, para os seis casos da Tabela 6.1. Dos gráficos representados nesta figura, obtém-se a seguinte análise:

- ✓ Nos casos 1 e 2 foi aplicada a mesma corrente de falta, considerada baixa com relação ao limite suportável pelo TC, e elevados valores de *burden* comparado ao valor padrão. Observa-se que nestes dois casos a forma de onda secundária real apresenta-se distorcida e reduzida com relação ao sinal ideal, tendo grau de saturação mais significativo no caso 2 em função do maior valor do *burden* considerado no secundário do TC.
- ✓ Nos casos 3 e 4 foi considerada uma corrente de falta no limiar (20 vezes a corrente primária do TC) do critério exposto na equação (2.26). No caso 3 foi adotado um *burden* padrão e, portanto, nota-se que a corrente primária foi refletida sem erros no seu secundário. Já no caso 4, o *burden* é majorado e causa a saturação do TC.
- ✓ Nos casos 5 e 6 foi considerada uma corrente de falta superior ao permitido pelo critério estabelecido na equação (2.26). Observa-se no caso 5 que, apesar de ser aplicada uma corrente de falta de 30 vezes o valor nominal do

TC, houve um pequeno grau de saturação, levando em conta que foi utilizado um *burden* padrão. Já no caso 6, mesmo com o *burden* padrão, o nível da corrente de falta foi extremamente elevado (60 vezes o valor nominal do TC), ocasionando uma severa saturação e com conseqüente distorção e redução da forma de onda secundária real.

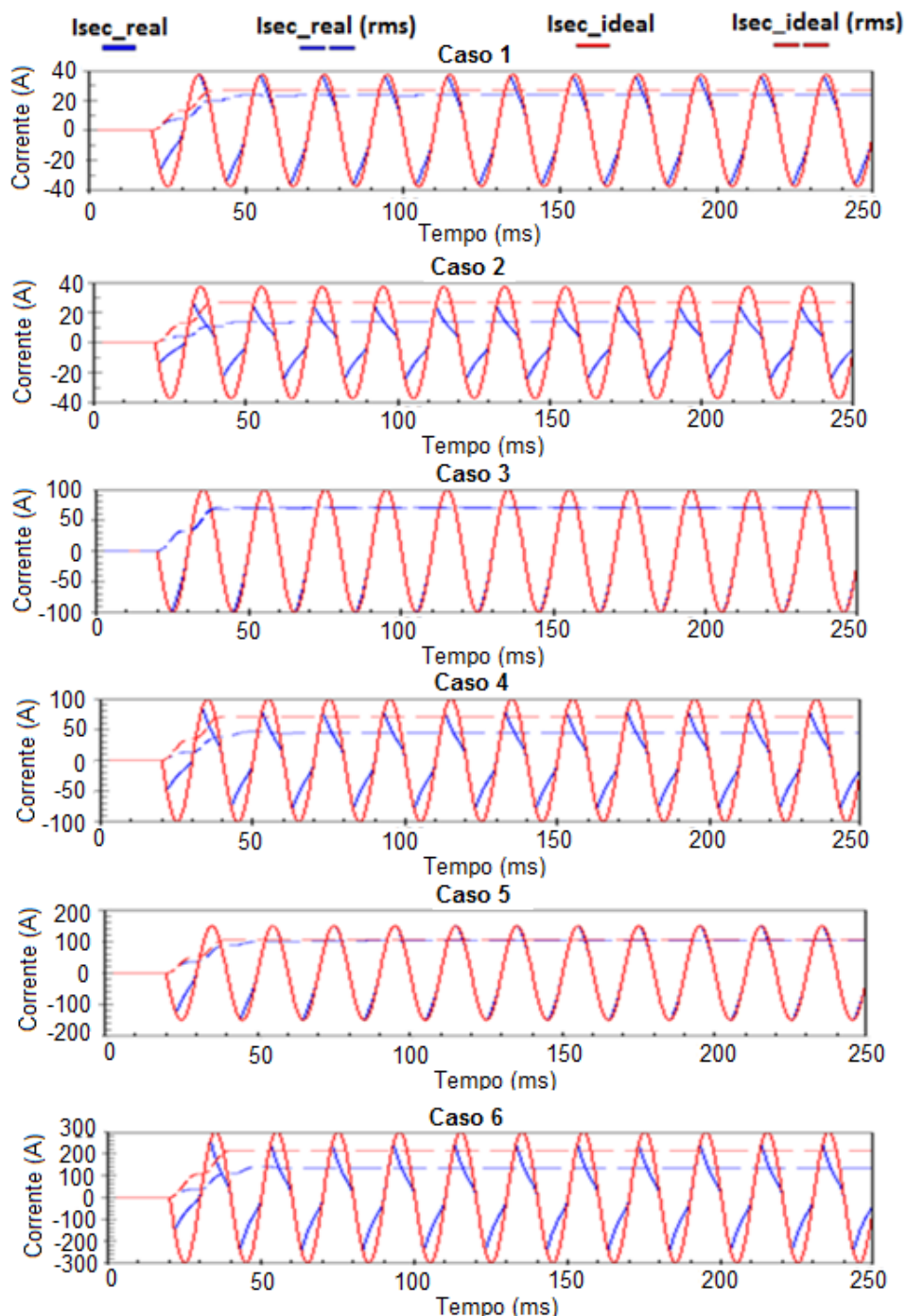


Figura 6.1 - Sinais secundários, resultantes do TC modelado em MATLAB, para os seis casos da Tabela 6.1.



A Figura 6.2 apresenta os mesmos sinais instantâneos representados na Figura 6.1 em resposta aos casos analisados na Tabela 6.1, porém para a metodologia utilizando o RTDS. Observa-se uma grande similaridade nas formas de ondas em ambas as metodologias aplicadas.

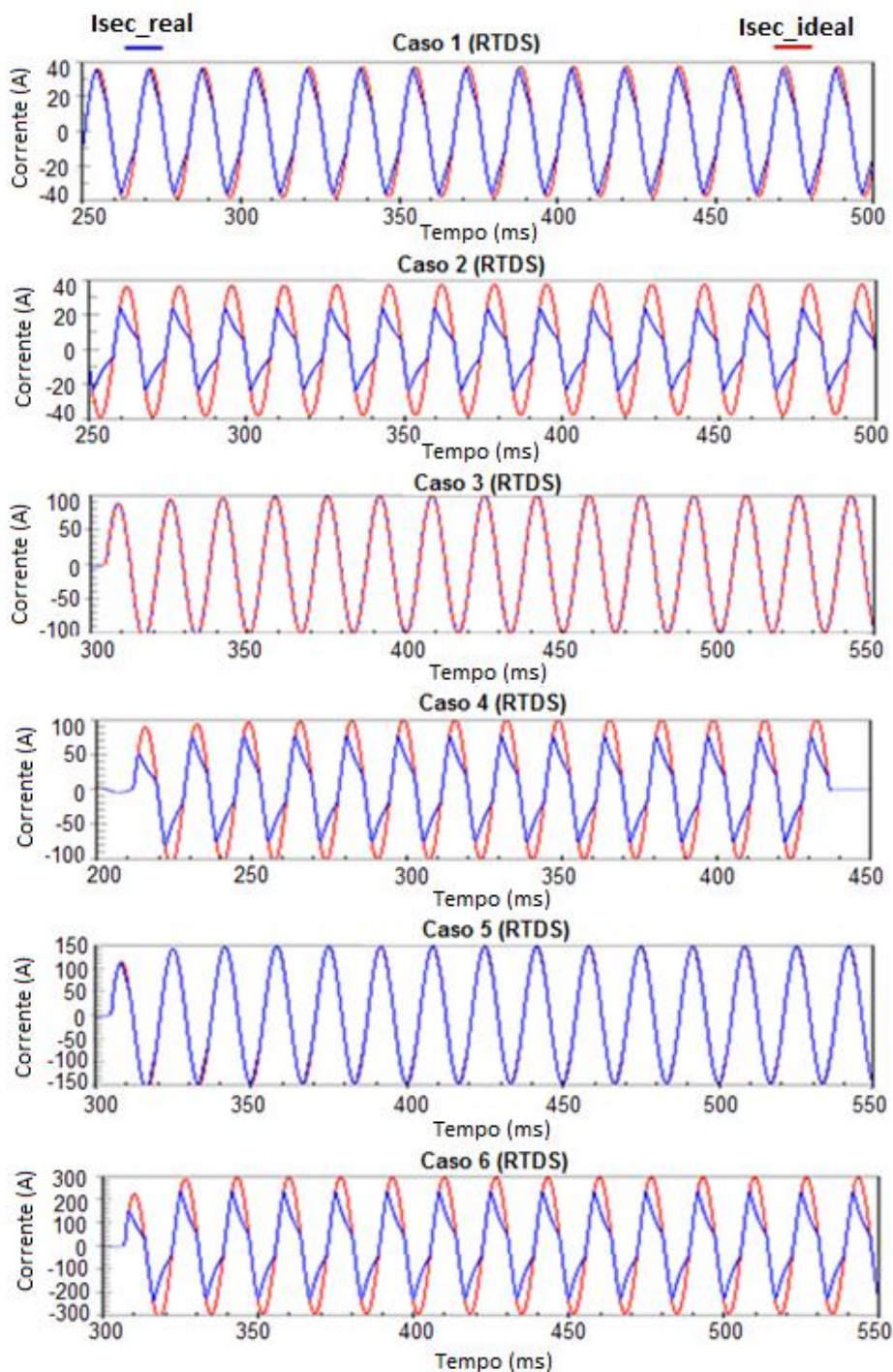


Figura 6.2 - Sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS, para os seis casos da Tabela 6.1.

### 6.2.1 Avaliação da proteção de sobrecorrente instantânea

Para avaliar a função de sobrecorrente instantânea sob os efeitos da saturação do TC decorrente da corrente de falta simétrica e do *burden*, cujos casos foram apresentados na Tabela 6.1, o relé numérico SEL 351-S teve sua função 50 ajustada da seguinte forma:

- *Pickup* de 15A para os casos 1 e 2;
- *Pickup* de 60A para os casos 3, 4, 5 e 6.

O atraso no tempo de operação deste relé frente à saturação do TC é determinado pelo tempo de resposta do relé quando submetido a sinais ideais (sem considerar a corrente de excitação) subtraído do tempo de resposta do relé quando submetido a sinais reais (quando exposto aos efeitos da saturação). Este atraso é especificado em ciclos na Tabela 6.2 para ambas as metodologias de testes.

**Tabela 6.2 - Tempo de resposta da função de sobrecorrente instantânea do relé SEL 351-S sob os efeitos da saturação do TC provocada pelo *burden* e corrente de falta simétrica.**

Caso	Testes com a caixa OMICRON a partir dos sinais do TC modelado em MATLAB			Testes por simulação HIL a partir dos sinais de um modelo de TC do RTDS		
	Isec_ideal (s)	Isec_real (s)	Diferença (ciclos)	Isec_ideal (s)	Isec_real (s)	Diferença (ciclos)
1	0,0471	0,0507	0,21686	0,0459	0,0493	0,20481
2	0,0471	Não atua	-	0,0459	Não atua	-
3	0,0501	0,0509	0,04819	0,0487	0,0492	0,03012
4	0,0501	Não atua	-	0,0487	Não atua	-
5	0,041	0,048	0,4375	0,0398	0,0465	0,4036
6	0,031	0,040	0,5421	0,03	0,0389	0, 5361

As formas de onda apresentadas nas Figuras 6.1 e 6.2, foram injetadas no relé SEL 351-S que, por sua vez, deveria filtrar e extrair corretamente o valor *rms* (através de DFT) para realizar as operações de proteção.

Cabe aqui mencionar que os valores *rms* mostrados nos gráficos foram calculados com base na teoria de DFT, através de rotinas presentes no programa

implementado no MATLAB, com a intenção de estimar o valor *rms* com o qual o relé realiza as suas operações.

Analisando estas formas de onda para os casos 1 e 3, observa-se que, para os respectivos valores de *pickup* ajustados, o relé atuará tanto para situações sem e com saturação do TC. Devido ao pequeno grau de saturação nestes dois casos, o atraso determinado pela diferença entre as formas de onda ideal e real é pequeno como mostrado na Tabela 6.2.

Para os casos 2 e 4, os sinais secundários do TC ficaram severamente distorcidos e com suas magnitudes reduzidas, provocando a não atuação da proteção instantânea para os respectivos valores de *pickup* ajustados. No caso 2, o fator predominante na saturação foi o elevado valor do *burden*. Já no caso 4, a associação da elevada corrente de falta e de um *burden* fora dos valores padrões ocasionou uma saturação significativa, fazendo com que o relé não “enxergasse” o valor desejado em ambas as metodologias, como mostrado na Tabela 6.2. Observa-se nas Figuras 6.1 e 6.2 que os valores *rms* dos casos 2 e 4 ficaram abaixo dos 15 e 60 A ajustados no relé, respectivamente, resultando na sua inoperância. Já para os casos 5 e 6, apesar dos valores de corrente acima do permitido pelas normas, principalmente no caso 6 onde houve um elevado grau de saturação, nota-se que o TC forneceu corrente suficiente para que o relé pudesse enxergar o valor *rms* em decorrência do seu ajuste, não gerando atraso significativo na sua operação.

### 6.2.2 Avaliação da proteção de sobrecorrente temporizada inversa

A saturação do TC não impacta somente na operação da função instantânea de sobrecorrente de relés numéricos. É natural que afete também a operação da função de sobrecorrente temporizada inversa destes relés. Por isso, os mesmos casos apresentados na Tabela 6.1 foram considerados e a resposta da função temporizada inversa do relé SEL 351-S foi avaliada frente a estes eventos em ambas as metodologias de testes utilizadas neste trabalho.

Para conduzir os testes, o relé SEL 351-S foi configurado com uma Curva IEC Muito Inversa (C2), um *pickup* de 7,5 A e um *dial* (DT) no valor de 0.05, conforme curva da equação (3.1) e as constantes da Tabela 2.2 (segunda linha).

A mesma definição de atraso na operação do relé sob os efeitos da saturação descrita na seção anterior é utilizada nesta análise.

O tempo de resposta da proteção de tempo inverso do relé SEL 351-S, para os casos detalhados na Tabela 6.1, são apresentados na Tabela 6.3 em ambas as metodologias de teste aplicadas.

**Tabela 6.3 - Tempo de resposta da função de sobrecorrente de tempo inverso do relé SEL 351-S sob os efeitos da saturação do TC provocada pelo *burden* e corrente de falta simétrica.**

Caso	Testes com a caixa OMICRON a partir dos sinais do TC modelado em MATLAB			Testes por simulação HIL a partir dos sinais de um modelo de TC do RTDS		
	Isec_ideal (s)	Isec_real (s)	Diferença (ciclos)	Isec_ideal (s)	Isec_real (s)	Diferença (ciclos)
1	0,325	0,386	3,674	0,317	0,374	3,433
2	0,325	1,093	46,265	0,317	1,079	45,903
3	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0
4	0,1	0,167	4,036	0,1	0,167	4,036
5	0,06	0,066	0,361	0,0587	0,0644	0,3433
6	0,033	0,058	1,5	0,032	0,056	1,44

A Figura 6.3 apresenta a Curva IEC Muito Inversa utilizada pelo relé testado, com seus respectivos valores de *dial*, que relaciona o seu tempo de resposta (especificados na Tabela 6.3) com o múltiplo do *pickup* em decorrência dos casos apresentados na Tabela 6.1.

Nota: Os valores considerados na Figura 6.3 são decorrentes dos testes com o TC implementado em MATLAB. Devido à proximidade dos resultados seria redundante apresentar a curva IEC para os dados provenientes do RTDS.

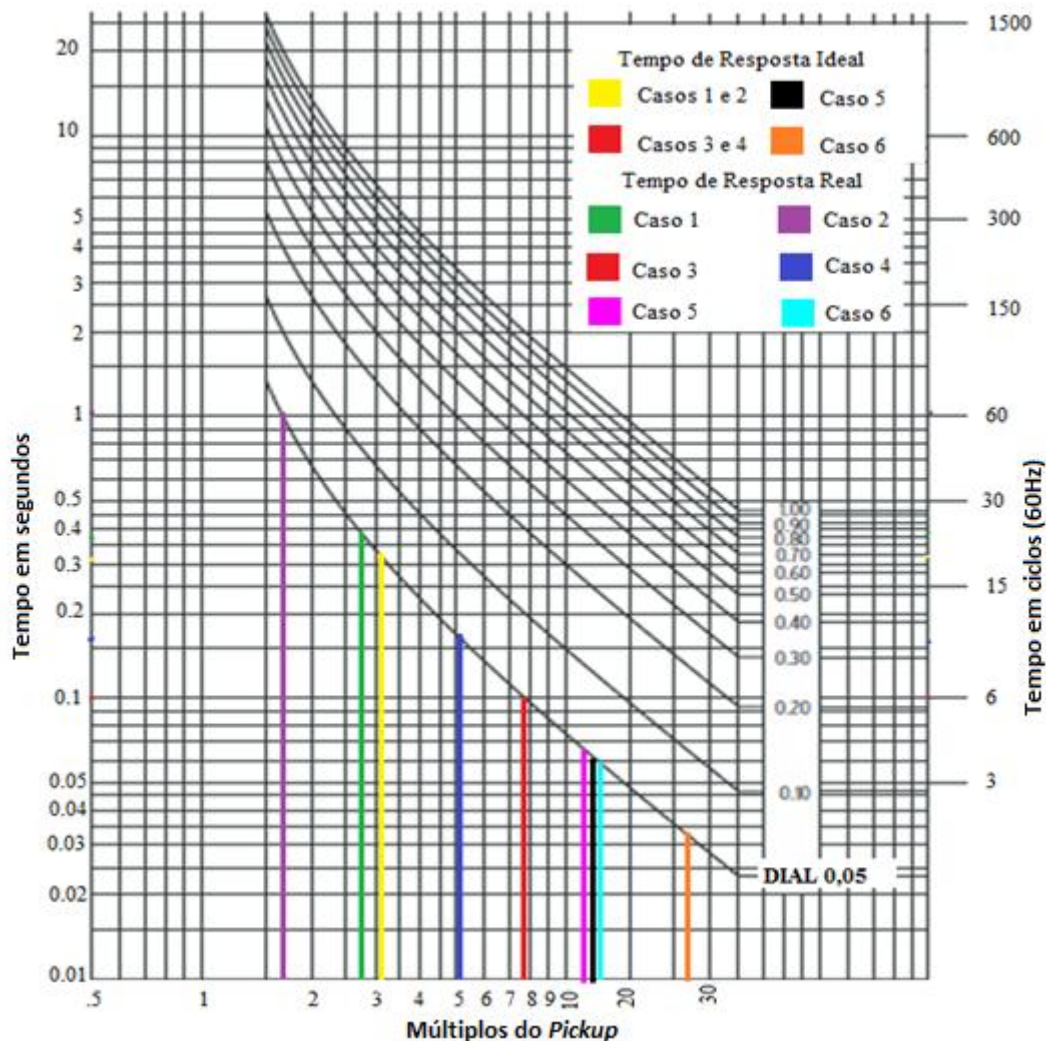


Figura 6.3 - Curva IEC Muito Inversa apresentando a resposta da função temporizada inversa do relé SEL 351-S resultante dos casos apresentados na Tabela 6.3.

Tomando como referência o caso ideal sem saturação, observa-se na Figura 6.3 (assim como na Tabela 6.3) que nos casos 1 e 2 ocorreram atrasos na operação do relé. Este retardo foi mais significativo no caso 2 devido ao *burden* ser mais elevado. A mesma justificativa se aplica ao constatar que no caso 4 houve atraso na operação deste relé. No caso 3, porém, o relé operou no tempo desejado, já que o TC não saturou e a corrente primária foi refletida com erros insignificantes no seu secundário.

Comparando com o caso 3, observa-se que nos casos 5 e 6 houve uma maior diferença entre os tempos de operações real e ideal do relé. Tal fato se deve ao maior nível de falta aplicado nestes dois casos, que diminuiu a corrente secundária real refletida no secundário, com conseqüente atraso na atuação do relé.

### 6.3 Efeitos da falta assimétrica e da relação X/R na resposta da proteção de sobrecorrente

O impacto da componente assimétrica na corrente de falta para a saturação do TC e seus efeitos na proteção de sobrecorrente do relé numérico SEL 351-S foram também avaliados, conforme os objetivos do trabalho.

Para esta análise foram adotados os quatros primeiros casos da Tabela 6.1 abordados na seção 6.2. Entretanto, em cada um desses casos foi considerada assimetria na corrente de falta com diferentes valores na relação X/R (3, 10, 16 e 25), como indicado na Tabela 6.4.

**Tabela 6.4 - Casos simulados para verificar a influência da relação X/R da corrente de falta assimétrica na saturação do TC.**

Caso	Múltiplo da corrente primária do TC (300 A)	Múltiplo do <i>burden</i> padrão do TC	X/R	Critério IEEE Equação (2.29) $20 \geq \left  1 + \frac{X}{R} \right  i_f \cdot z_b$
1	7,5	5	3	$20 < 150$
			10	$20 < 412,5$
			16	$20 < 637,5$
			25	$20 < 975$
2	7,5	10	3	$20 < 300$
			10	$20 < 825$
			16	$20 < 1275$
			25	$20 < 1950$
3	20	1	3	$20 < 80$
			10	$20 < 220$
			16	$20 < 340$
			25	$20 < 520$
4	20	3	3	$20 < 240$
			10	$20 < 660$
			16	$20 < 1020$
			25	$20 < 1560$

Cabe aqui mencionar que uma relação  $X/R$  igual a 25 já é um valor relativamente elevado, válida para faltas pertos de grandes fontes.

Pelo critério IEEE Std. C37.110 (2007) definido na equação (2.29), em todos os casos apresentados na Tabela 6.4 irão ocorrer a saturação do TC. Os sinais secundários ideais e reais, resultantes do modelo implementado em MATLAB, são apresentados nas Figuras 6.4 a 6.7.

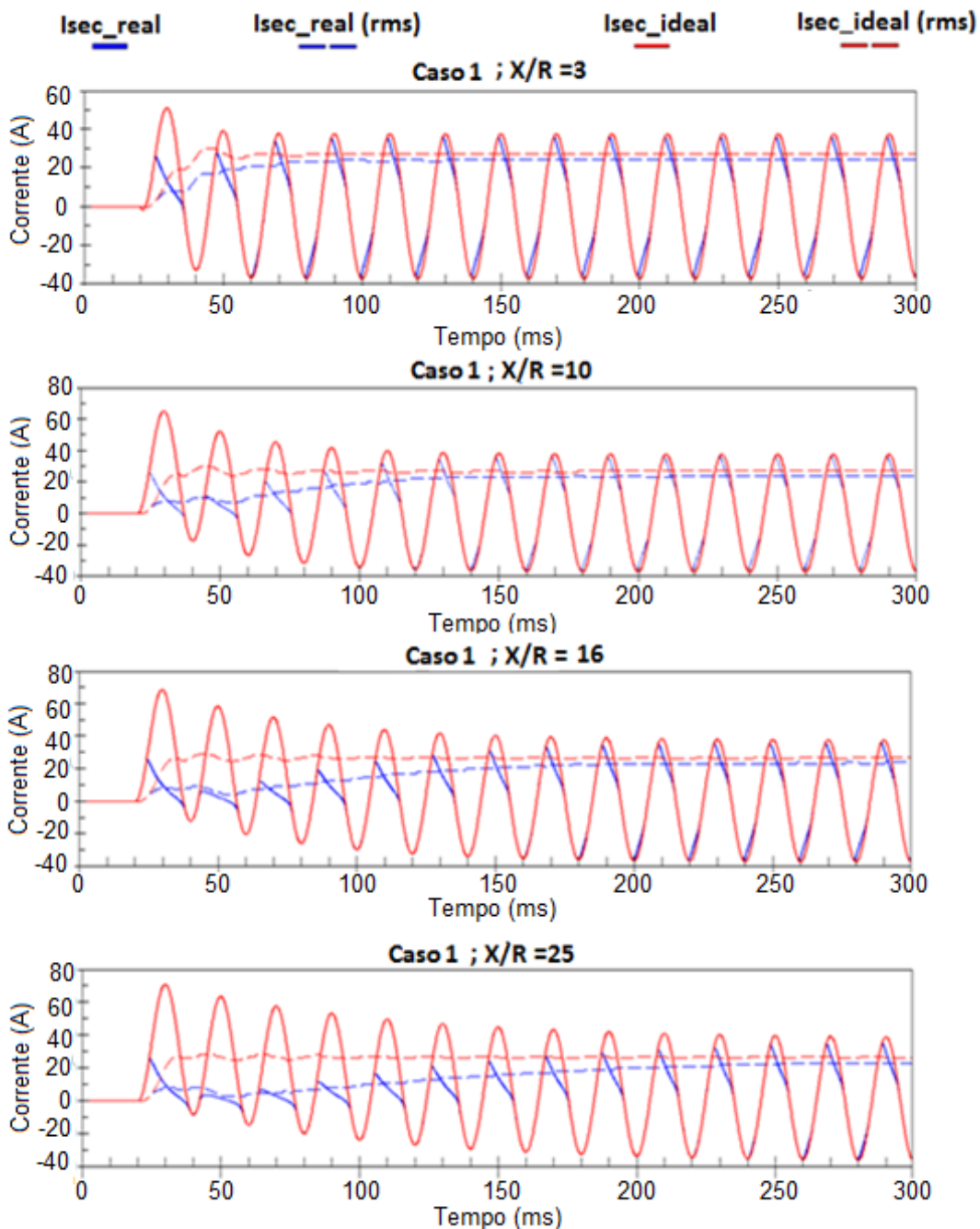


Figura 6.4 - Sinais secundários, resultantes do TC modelado em MATLAB, considerando assimetria e relação  $X/R$  (3, 10, 16 e 25) para o caso 1 indicado na Tabela 6.4.

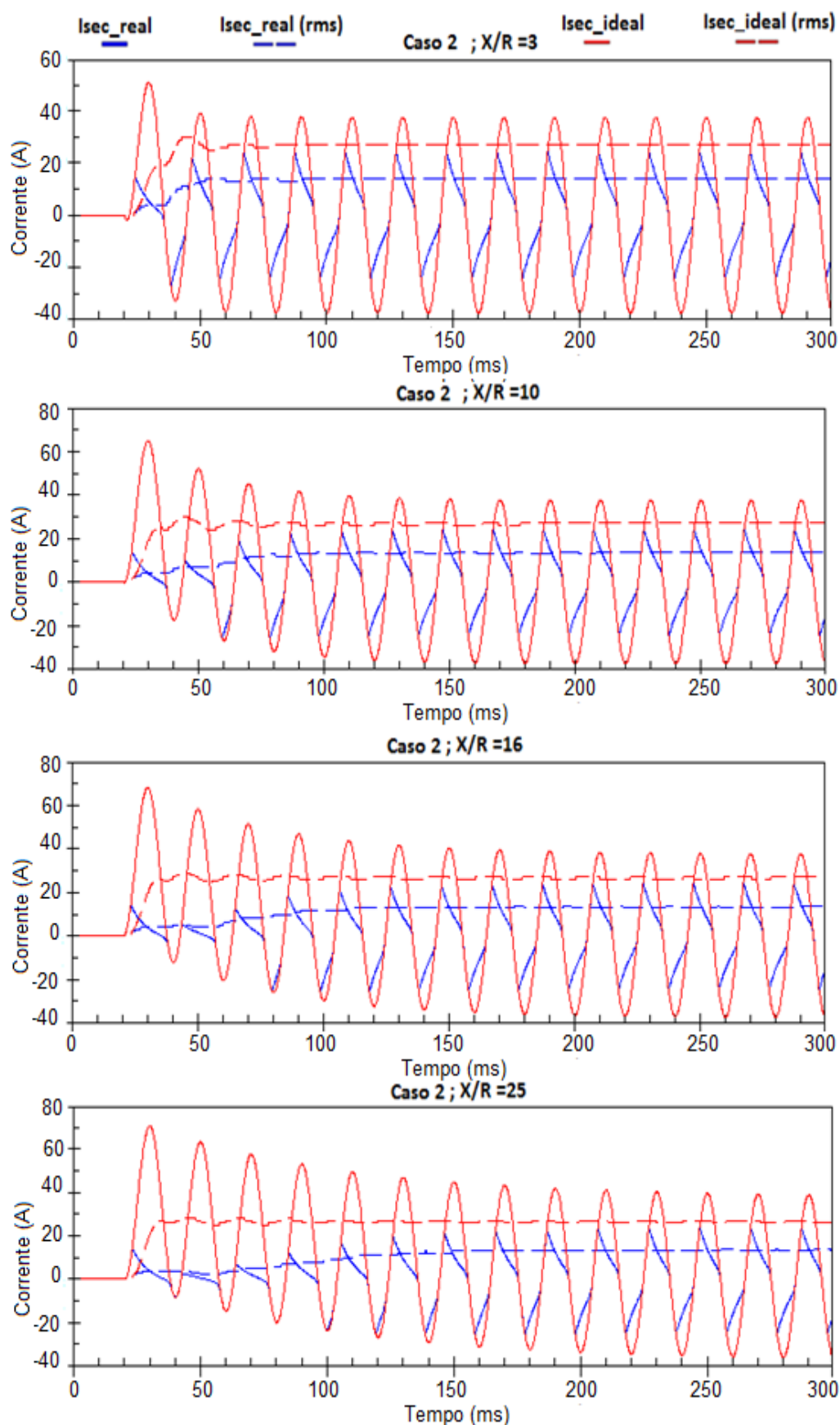


Figura 6.5 - Sinais secundários, resultantes do TC modelado em MATLAB, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 2 indicado na Tabela 6.4.



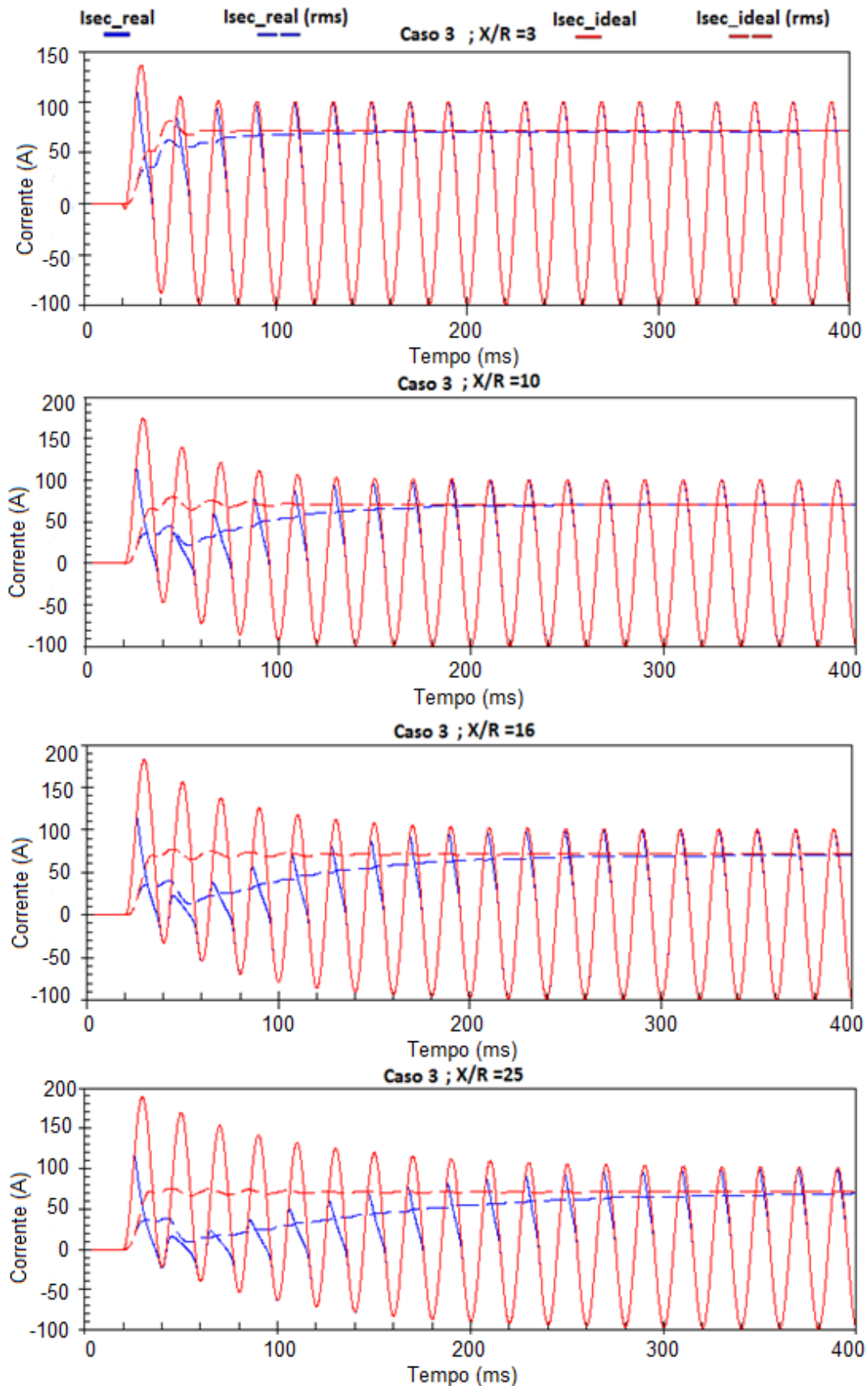


Figura 6.6 - Sinais secundários, resultantes do TC modelado em MATLAB, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 3 indicado na Tabela 6.4.

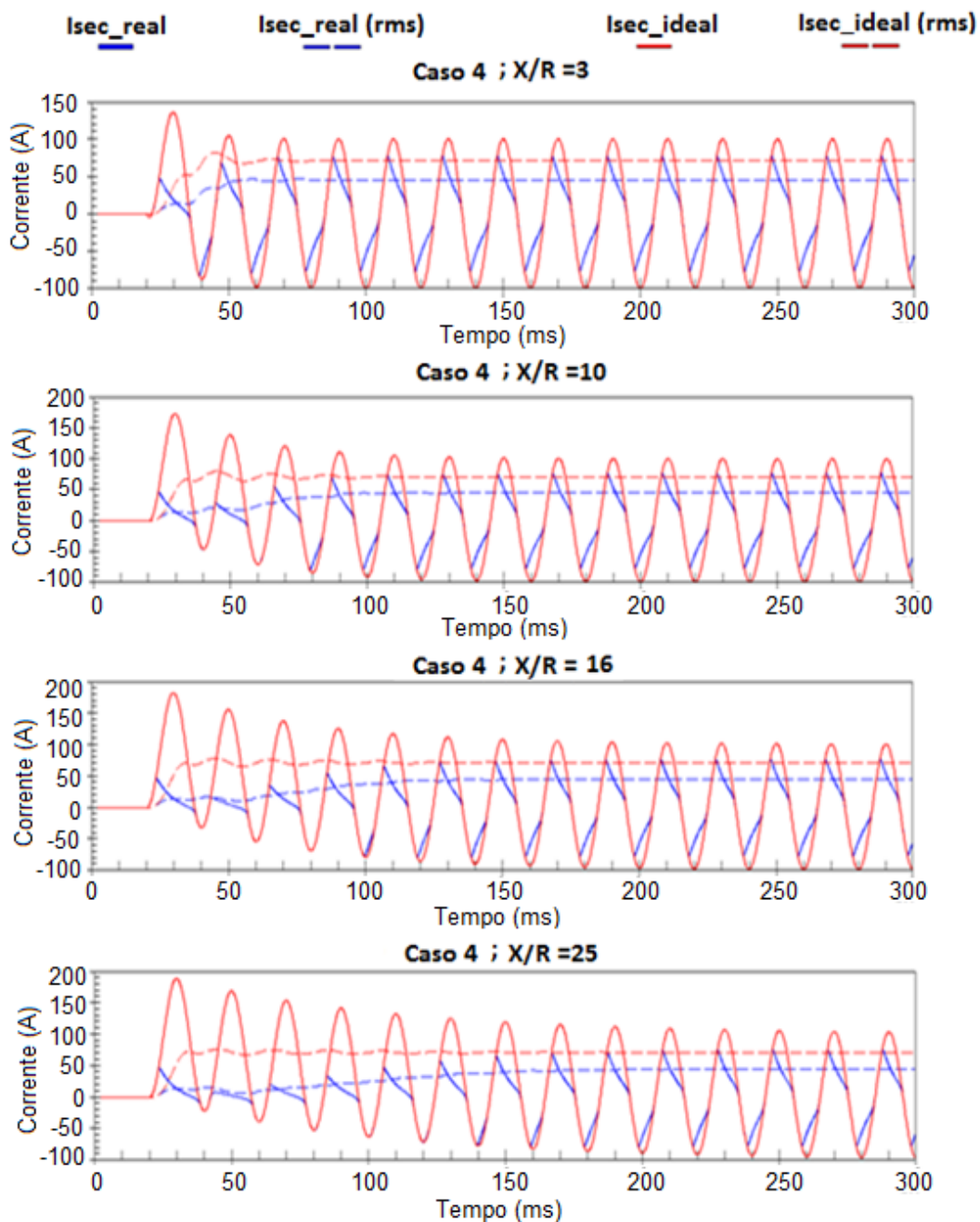


Figura 6.7 - Sinais secundários, resultantes do TC modelado em MATLAB, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 4 indicado na Tabela 6.4.

Nas Figuras 6.4 e 6.5 estão as formas de onda da corrente secundária do TC para os casos 1 e 2, respectivamente, com diferentes valores de relação X/R. Comparadas aos mesmos casos da Figura 6.1 (sem assimetria), observa-se que com o aumento da relação X/R, maior a duração do decaimento exponencial e, por consequência, mais tempo a forma de onda permanece distorcida e com a magnitude reduzida no estado de assimetria. Para uma relação X/R =3, nota-se que houve um

rápido desaparecimento da componente DC. Para uma relação  $X/R = 10$ , a forma de onda da corrente secundária só chegou ao seu estado de simetria após 7 ciclos da aplicação da falta. Para  $X/R=16$ , a assimetria durou 10 ciclos e para  $X/R = 25$  permaneceu por aproximadamente 15 ciclos até o sinal ficar totalmente simétrico.

A mesma análise foi realizada para avaliar as formas de onda dos casos 3 e 4 ilustrados nas Figuras 6.6 e 6.7, respectivamente. Diferentemente do caso 3 representado na Figura 6.1, o TC saturou para este caso em função da componente aperiódica da falta. Porém, ao considerar uma relação  $X/R = 3$ , relativamente pequena, percebeu-se que a componente DC desapareceu rapidamente, não influenciando em muito na saturação do TC.

Nos casos 3 e 4, ao aumentar a relação  $X/R$ , também se constatou que o tempo para o TC sair do estado de assimetria foi maior. Devido à elevada corrente de falta, o grau de distorção do sinal foi mais acentuado do que nos casos 1 e 2.

Assim como para os casos de simetria analisados na seção 6.2, as formas de onda da corrente secundária instantânea do TC, proveniente do sistema simulado no RTDS, apresentaram similaridades com as do TC implementado em MATLAB. Tais formas de onda encontram-se no Apêndice A.

### 6.3.1 Avaliação da proteção de sobrecorrente instantânea

A operação da função de sobrecorrente instantânea do relé SEL 351-S sob os efeitos da corrente de falta com máxima assimetria foram então avaliados. Os mesmos ajustes deste relé utilizados na seção 6.2.1 foram aqui considerados.

Nesta análise, para economia de espaço, são apresentados somente o tempo de operação do relé nos casos 1 e 3 da Tabela 6.4. Os casos 2 e 4 não são mostrados, pois na análise realizada na seção 6.2.1 para estes mesmos casos, considerando falta simétrica e *burden* elevados, o relé não operou. Portanto, ao incrementar assimetria nestes sinais, o grau de saturação tende a se elevar, e o relé certamente continuará no mesmo estado de inoperância.

O tempo de resposta da função 50 do relé SEL 351-S para os casos 1 e 3 são apresentados na Tabela 6.5 em ambas as metodologias de teste aplicadas.

Tabela 6.5 - Tempo de resposta da função de sobrecorrente instantânea do relé SEL 351-S sob os efeitos da saturação do TC provocada pelo incremento de assimetria na corrente de falta.

Caso	X/R	Testes com a caixa OMICRON a partir dos sinais do TC modelado em MATLAB			Testes por simulação HIL a partir dos sinais de um modelo de TC do RTDS		
		Isec_ideal (s)	Isec_real (s)	Diferença (ciclos)	Isec_ideal (s)	Isec_real (s)	Diferença (ciclos)
1	3	0,0437	0,0545	0,650	0,0397	0,0492	0,572
	10	0,0446	0,0957	3,0783	0,0401	0,0897	2,9879
	16	0,0429	0,1162	4,4156	0,0383	0,1085	4,2289
	25	0,0416	0,157	6,9518	0,0395	0,153	6,8373
3	3	0,0462	0,0856	2,37	0,0441	0,0832	2,35
	10	0,0467	0,1468	6,0301	0,0432	0,1422	5,9638
	16	0,0463	0,1963	9,0361	0,0427	0,1904	8,8975
	25	0,0456	0,286	14,4819	0,0435	0,2785	14,1566

Comparando o caso 1 da Tabela 6.2 com o seu respectivo caso na Tabela 6.5, com assimetria na corrente de falta, observa-se que o atraso na operação é tanto maior quanto maior for a relação X/R. Fica evidente pela Figura 6.4 que a forma de onda da corrente secundária real do TC para o caso 1 teve sua magnitude reduzida nos primeiros ciclos em comparação ao sinal simétrico ilustrado na Figura 6.1. Por essa razão, o sinal *rms* extraído pelo relé também ficará reduzido e atrasará sua operação. No caso 3, apresentado na Tabela 6.2, cuja análise considerou apenas simetria na corrente de falta, concluiu-se que praticamente não houve atraso na operação instantânea do relé, visto que o TC operava para uma corrente de falta dentro dos limites suportáveis pela equação (2.26). Porém, neste novo caso, a assimetria da falta, associada à relação X/R, torna-se um fator determinante para a saturação do TC, como apresentado na Figura 6.6. Por isso, o relé “enxerga” sinais reduzidos e atrasa sua operação na proporção em que se aumenta a relação X/R, como mostrado na Tabela 6.5.

### 6.3.2 Avaliação da proteção de sobrecorrente temporizada inversa

Para tal análise, os mesmos ajustes utilizados na seção 6.2.2 são considerados aqui.

O tempo de operação para a função 51 do relé SEL 351-S, para os casos detalhados na Tabela 6.5, são apresentados na Tabela 6.6 para ambas as metodologias.

**Tabela 6.6 - Tempo de resposta da função de sobrecorrente de tempo inverso do relé SEL 351-S sob os efeitos da saturação do TC provocada pelo incremento de assimetria na corrente de falta.**

Caso	X/R	Testes com a caixa OMICRON a partir dos sinais do TC modelado em MATLAB			Testes por simulação HIL a partir dos sinais de um modelo de TC do RTDS		
		Isec_ideal (s)	Isec_real (s)	Diferença (ciclos)	Isec_ideal (s)	Isec_real (s)	Diferença (ciclos)
1	3	0,325	0,392	4,036	0,317	0,381	3,855
	10	0,325	0,425	6,024	0,317	0,416	5,975
	16	0,325	0,433	6,506	0,317	0,425	6,506
	25	0,325	0,466	8,493	0,317	0,453	8,192
2	3	0,325	1,052	43,79	0,317	1,036	43,313
	10	0,325	1,096	46,445	0,317	1,085	46,265
	16	0,325	1,119	47,831	0,317	1,106	47,530
	25	0,325	1,138	48,975	0,317	1,122	48,493
3	3	0,100	0,108	0,481	0,100	0,107	0,421
	10	0,100	0,139	2,349	0,100	0,135	2,162
	16	0,100	0,163	3,795	0,100	0,158	3,542
	25	0,100	0,204	6,265	0,100	0,200	6,024
4	3	0,100	0,175	4,51	0,100	0,172	4,337
	10	0,100	0,195	5,722	0,100	0,191	5,481
	16	0,100	0,200	6,024	0,100	0,200	6,024
	25	0,100	0,236	8,192	0,100	0,232	7,951

Comparando os casos da Tabela 6.3 com seus respectivos casos na Tabela 6.6, observa-se que o atraso na operação é tanto maior quanto maior a relação X/R. Os efeitos dessa relação no sinal proveniente dos casos indicados na Tabela 6.6 foram mostrados nas Figuras 6.4 a 6.7.

Para analisar o impacto da assimetria no tempo de operação da função de sobrecorrente inversa do relé SEL 351-S, o caso 3 é tomado como referência. Quando considerada apenas a simetria na corrente de falta, o relé atuou no tempo

desejado sem atraso. Ao inserir uma assimetria no sinal, o TC satura e a forma de onda fica distorcida e reduzida por um período de tempo diretamente dependente da relação X/R. Estes sinais foram então usados para alimentarem o relé numérico, resultando em tempo de operação indevidos.

A Figura 6.8 mostra a Curva IEC Muito Inversa utilizada no relé testado para comparar o atraso no tempo de operação da função 51 para o caso 3 com assimetria (ver Tabela 6.6) e considerando apenas simetria no sinal (ver Tabela 6.3).

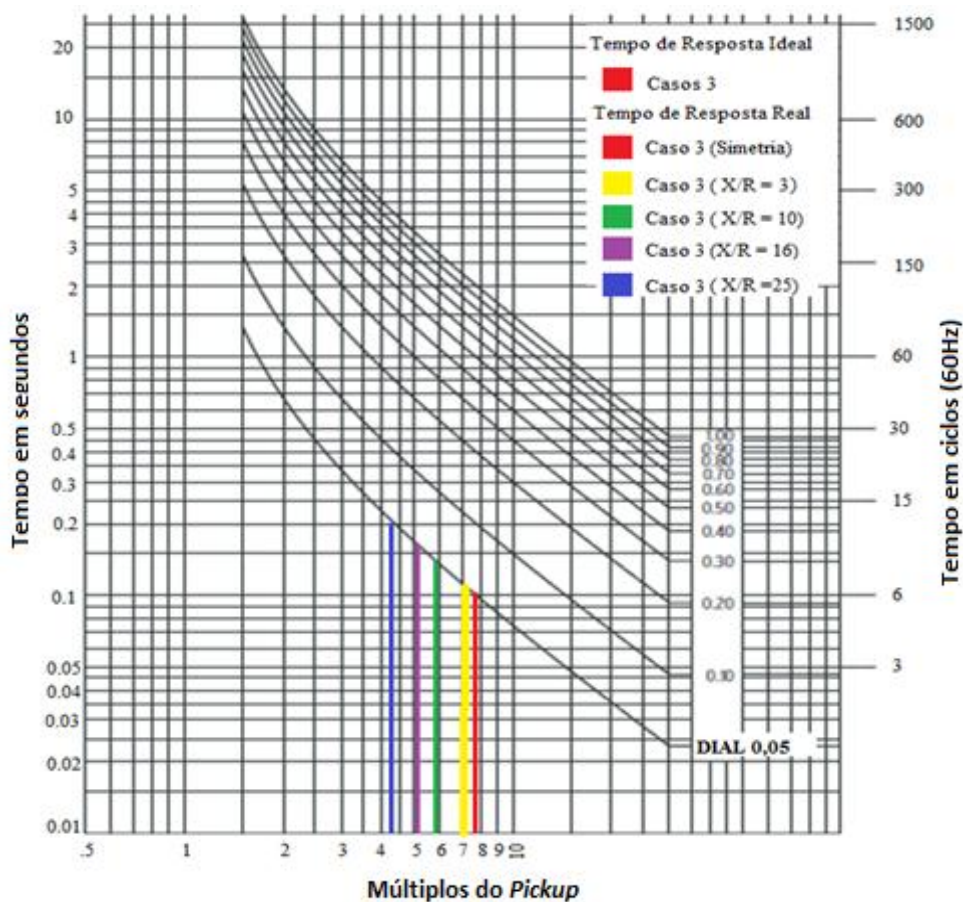


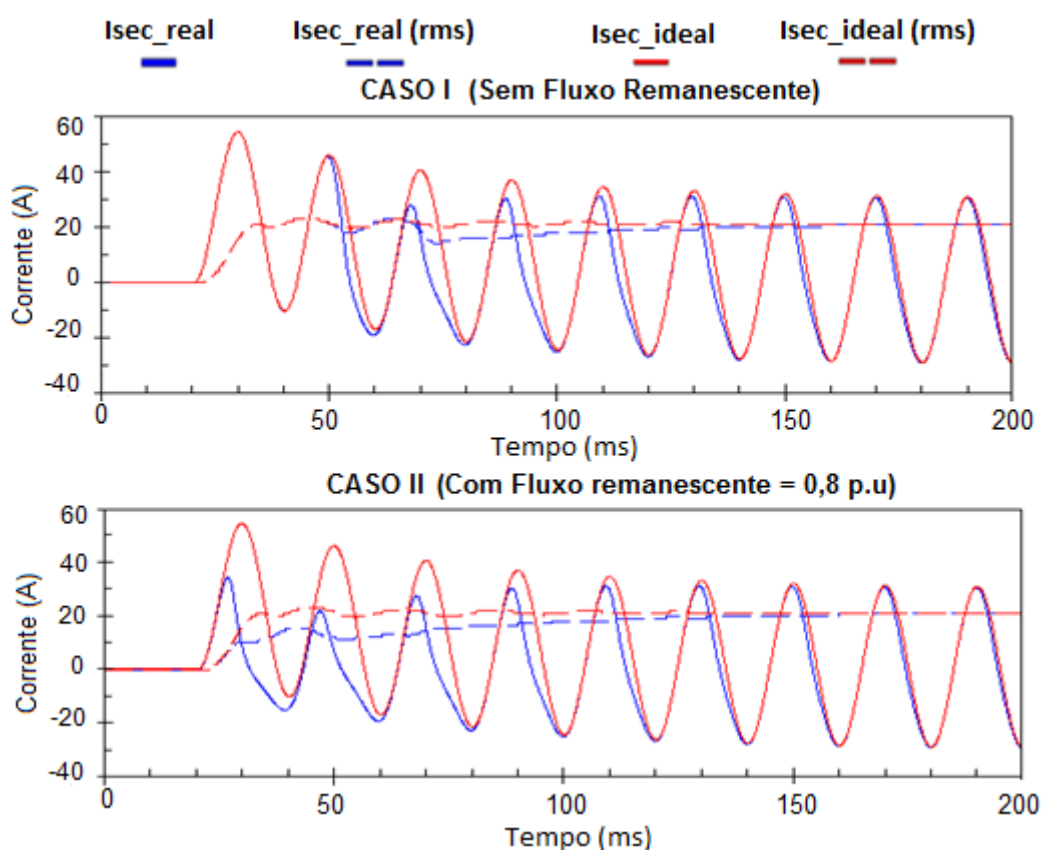
Figura 6.8 - Curva IEC Muito Inversa apresentando a resposta da função temporizada inversa do relé SEL 351-S para o caso 3 com e sem assimetria.

## 6.4 Efeitos da remanência na resposta da proteção de sobrecorrente

Conforme já mencionado, o fluxo remanescente também influencia na saturação de um TC e, por consequência, na operação de um relé de proteção.

Para esta análise foram investigados dois casos:

- ✓ Caso I: Inicialmente um caso com uma corrente de falta de 6 vezes a corrente nominal, com componente assimétrica ( $X/R = 15$ ) e com *burden* padrão;
- ✓ Caso II: Os mesmos parâmetros do Caso I foram considerados, porém levando em conta os efeitos de um fluxo remanescente no valor de 0.8 p.u.



**Figura 6.9 - Sinais secundários, resultantes do TC modelado em MATLAB, para um caso sem e com fluxo remanescente.**

A Figura 6.9 apresenta os sinais secundários do TC para os dois casos citados no parágrafo anterior. Observa-se que ao adicionar a remanência, a forma de onda apresentou-se mais distorcida e com redução no valor *rms* nos primeiros ciclos, em comparação ao mesmo caso sem fluxo remanescente.

Assim como para os casos apresentados nas seções anteriores, as formas de onda da corrente secundária instantânea do TC, proveniente do sistema simulado no

RTDS, apresentaram similaridades com as do TC implementado em MATLAB. Tais formas de onda encontram-se no Apêndice B.

### 6.4.1 Avaliação da proteção de sobrecorrente

Nesta seção é avaliada a operação da função de sobrecorrente (50 e 51) do relé SEL 351-S sob os efeitos dos sinais resultantes dos casos apresentados na seção 6.4. A função 50 do relé foi ajustada com um *pickup* de 20A e a função 51 foi configurada com uma curva IEC Muito Inversa (C2), um *pickup* de 5A e um *dial* (DT) no valor de 0,05.

O tempo de resposta das funções 50 e 51 do relé SEL 351-S são mostrados na Tabela 6.7 em ambas as metodologias de teste aplicadas.

**Tabela 6.7 - Tempo de resposta da função de sobrecorrente (50 e 51) do relé SEL 351-S sob os efeitos do fluxo remanescente na saturação do TC.**

Caso	Testes com a caixa OMICRON a partir dos sinais do TC modelado em MATLAB			Testes por simulação HIL a partir dos sinais de um modelo de TC do RTDS		
	Avaliação da função de sobrecorrente instantânea (50)					
	Isec_ideal (s)	Isec_real (s)	Diferença (ciclos)	Isec_ideal (s)	Isec_real (s)	Diferença (ciclos)
I	0,0321	0,0321	0	0,0319	0,0319	0
II	0,0321	0,1124	5,43	0,0319	0,1120	5,307
Caso	Avaliação da função de sobrecorrente temporizada inversa (51)					
I	0,1985	0,234	2,13	0,1979	0,232	2,05
II	0,1985	0,234	2,13	0,1979	0,232	2,05

Analisando os dados da Tabela 6.7, observa-se que, para o valor de *pickup* ajustado, não houve atraso no caso I. Observa-se na Figura 6.9 que o TC satura depois do primeiro ciclo de falta, fornecendo corrente suficiente para o relé realizar sua operação sem atraso.

Comparando o caso II com o caso I, houve um atraso de aproximadamente cinco ciclos na operação da função 50 do relé. Nota-se na Figura 6.9 que a forma de onda da corrente secundária real do TC para o caso II tem sua magnitude reduzida nos primeiros ciclos em decorrência dos efeitos do fluxo remanescente. O sinal *rms*,



proveniente deste sinal, extraído pelo relé também é reduzido e este só “enxerga” o *pickup* ajustado depois de cinco ciclos, atrasando assim sua operação.

Os dados contidos na Tabela 6.7 mostram que, para os parâmetros ajustados na função 51 do relé (*pickup*, *dial* e tipo de curva), não houve diferença na operação do relé para os casos analisados ao considerar os efeitos do fluxo remanescente. A Figura 6.9 mostra que a magnitude destes sinais difere apenas nos primeiros ciclos. O tempo desejado para operação do relé, considerando o sinal ideal, é de aproximadamente 12 ciclos (0,198 segundos). Portanto, o atraso na operação do relé não é devido ao fluxo remanescente no sinal, uma vez que este fator tem influência na saturação apenas nos primeiros ciclos. O fator que determina este retardo na resposta do relé é a assimetria na corrente de falta e o elevado valor da relação X/R.

Na prática, o problema do fluxo remanescente é bastante preocupante quando existe religamento automático. O relé abre a falta, o religador conta o tempo morto e religa. Se a falta for permanente e o fluxo remanescente for elevado, o TC poderá entrar em saturação logo no primeiro ciclo e o relé, que deve prontamente desligar para uma falta permanente, não operar no tempo adequado.

### 6.5 Considerações Finais

Foi apresentada neste capítulo uma análise de saturação de TC considerando alguns sinais simulados, especificados em casos, levando em conta fatores de influência na saturação, tais como: corrente de falta simétrica e *burden*, assimetria na corrente de falta e relação X/R, além do fluxo remanescente.

A resposta das funções de sobrecorrente instantânea e temporizada inversa do relé SEL 351-S foi avaliada frente a estes sinais saturados em termos de tempo de operação deste dispositivo.

Observou-se, das simulações e testes, que a resposta do relé de sobrecorrente era severamente afetada à medida que o grau de saturação do TC aumentava. Mostrou-se que a saturação tende a reduzir a corrente esperada, de modo que o relé passa a “ver” uma corrente menor, atrasando assim a sua operação. Vale destacar que, a resposta do relé está intimamente ligada aos ajustes do mesmo. Dependendo do tipo de aplicação, é possível, mesmo o TC saturando, que a corrente secundária

vista pelo relé seja superior ao *pickup* instantâneo ajustado no relé, não afetando na sua operação.

Vale destacar que foram obtidos sinais secundários semelhantes do TC implementado matematicamente em MATLAB em comparação com o TC do RTDS utilizado nos testes, visto que este último foi parametrizado de tal forma a compatibilizar ao máximo com o modelo implementado em MATLAB. Tal semelhança é refletida nos tempos de atuações do relé sob teste. A pequena diferença observada é devida aos modelos não serem exatamente iguais, como, por exemplo, na forma como é obtida a curva de excitação.

## *Capítulo 7*

---

### *Considerações Finais*

## 7.1 Conclusões

O primeiro objetivo deste trabalho foi o de implementar uma rotina computacional, de fácil manuseio, para a observação do comportamento de um TC, principalmente frente a diferentes condições de falta e de carregamento secundário. Assim, um eficiente e preciso modelo de TC, baseado na teoria publicada pelo *IEEE PSRC*, foi implementado em MATLAB. A rotina mostrou ser uma ferramenta conveniente para avaliar a resposta transitória do TC e os fatores que levam o mesmo a saturar. Além de uma melhor compreensão do fenômeno da saturação, os sinais de corrente secundária resultantes em qualquer rodada podem ser convertidos para o formato COMTRADE e guardados em um banco de dados. Estes arquivos COMTRADE podem ser carregados em um equipamento de injeção de corrente para testes em qualquer tipo de relé numérico, com qualquer função de proteção.

De modo complementar, um modelo de TC foi também avaliado através de um Simulador Digital em Tempo Real. Neste caso, o modelo é próprio do RSCAD, *software* do RTDS. Também nestes estudos, os sinais secundários podem ser externados através de amplificadores de corrente e injetados diretamente em qualquer relé numérico funcionando em *Hardware-In-The-Loop*, cujo objetivo é a avaliação do comportamento tanto do TC quanto do relé de proteção.

Como resultados gerais, pôde-se primeiramente verificar que os sinais resultantes do secundário do TC, em ambos os métodos, apresentaram similaridades em magnitude e forma de onda, validando-se, assim, o programa implementado no MATLAB.

Outro importante objetivo do trabalho foi o de avaliar um relé de sobrecorrente numérico (funções instantânea e temporizada) diante das diferentes formas de onda distorcidas por saturação de TCs. Tempos de operação destas funções foram obtidos e analisados para ambos os métodos empregados, chegando a valores muito próximos um do outro.

É importante esclarecer que a simulação HIL pelo RTDS, mostrou ser um método rápido e efetivo para testes em relés, permitindo uma maior repetibilidade e uma análise contínua e em tempo real dos sinais resultantes do sistema. Além disso, o RTDS possui outras vantagens em relação à metodologia implementada no

MATLAB, considerando a flexibilidade em expandir o sistema analisado e realizar estudos de coordenação e seletividade de proteção, sem a necessidade de elaborar um algoritmo com tais funcionalidades. Entretanto, sempre que um usuário desejar ter uma estimativa de uma forma de onda de TC saturado, ele poderá recorrer ao programa implementado em MATLAB, considerando que pouquíssimos laboratórios possuem um equipamento como o RTDS, principalmente em função do seu alto custo. Neste caso, o trabalho traz uma importante contribuição.

Com base nos resultados desta dissertação, a seleção do TC poderia ser feita verificando-se o tempo de operação do relé testado. Os estudos mostram, por exemplo, que um TC mesmo não atendendo o critério determinado pela norma IEEE Std. C37.110 (2007), pode ainda operar sem causar nenhum problema ao sistema de proteção. Em certos casos, o TC somente entraria em saturação após alguns ciclos da falta, provendo, assim, corrente suficiente para atuação da função instantânea para um determinado ajuste. Por outro lado, a proteção de sobrecorrente temporizada poderá ser significativamente afetada pelo grau de saturação do TC, sendo este dependente de fatores como o nível da corrente de falta, da relação  $X/R$ , do *burden* e do fluxo remanescente no núcleo, os quais poderão causar a redução na magnitude da corrente e conseqüente atraso na operação desta função no relé numérico.

Finalmente, enfatiza-se que os atrasos encontrados nos testes dos relés numéricos de sobrecorrente (o mesmo ocorreria se fossem relés eletromecânicos) não deveriam existir. Ao contrário, de fato um relé moderno deveria ser capaz de extrair corretamente o valor *rms* da componente fundamental de um sinal distorcido por harmônicos e/ou por componente DC aperiódica. Infelizmente, no caso de saturação de TCs, este ainda é um problema não totalmente resolvido e, portanto, ainda um caminho aberto para o desenvolvimento de novos algoritmos mais inteligentes, que possam extrair em alta velocidade os valores corretos da componente de 60 Hz, mesmo diante de forte distorção por saturação.

### 7.2 Proposta para trabalhos futuros

Segundo a linha de pesquisa desenvolvida nesta dissertação e tendo em vista os resultados obtidos, ficam algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolver e avaliar novos algoritmos de proteção com a utilização de técnicas de DSP e/ou IA (Inteligência Artificial) para detecção e reconstituição dos valores de magnitude e ângulo de fase dos sinais distorcidos em decorrência da saturação do TC em uma plataforma de simulação digital em tempo real (RTDS);
- Aplicação daquela técnica que melhor se adaptará há um sistema de simulação em tempo real, com a finalidade de elaborar um protótipo *Hardware-in-the-Loop* no RTDS com as funcionalidades descritas acima.

---

## *Referências Bibliográficas*

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Transformador de Corrente – Especificação. NBR 6856**, 1992.

AL-ABBAS, N.H. Efficient proposed solutions for current transformers saturation effects on overcurrent relays operations in distribution systems. **Universities Power Engineering Conference (UPEC)**, 2009.

BEEMAN, D. **Industrial Power System Handbook**, McGraw-Hill Book Company, NY, 1955.

BRIDGER, B.; BURSE, T.A. Operation of ground sensor relays under conditions of partial CT saturation. **Industry Applications Conference**, 1996.

CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1977.

DAVID, C.Y.; CUMMINS J.C.; WANG, Z.; KOJOVIC, LJ. A. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 16, nº 2, p.189-194, 2001.

EL-AMIN, I.M.; AL-ABBAS, N.H. Saturation of Current Transformers and its Impact on Digital Overcurrent Relays. **IEEE Transmission & Distribution Conference and Exposition Latin America**, 2006.

GUERRA, F. C. F.; MOTA, W. S. Current transformer model. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2007.

GUERRA, F. C. F.; MOTA, W. S. Modelo de transformador de corrente com entreferro, **VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais – Induscon**, 2008.

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, nº 1, pp. 47-54, Janeiro 2010.

IEC 60044. **Instrument Transformers**, 1992.



IEC 60255-3. **Electrical Relays. Part 3: Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time**, 1989.

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

IEEE Std. C57.13.2008. **IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers**, 2008.

IEEE Power System Relay Committee. Gapped Core Current Transformer Characteristics and Performance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 5, no. 4, pp. 1732-1740, 1990.

IEEE Power System Relay Committee. Transient Response of Current Transformers. **IEEE Report. 76 CH 1130-4 PWR**, 1976.

Instruction Manual for Overcurrent Protection System (SEL 351-S Relay), 2009.

JIUPING PAN; KHOI VU; YI HU. An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 19, n° 4, p. 1623-1628, 2004.

KANG, Y.C.; OK, S.H.; KANG, S.H.; CROSSLEY, P.A. Design and evaluation of an algorithm for detecting current transformer saturation. **Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceeding**, 2004.

KEZUNOVIC, M.; FROMEN; C. W.; PHILLIPS, F. Experimental Evaluation of EMTP Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1994.

KOJOVIC, L.J.A. Impact of Current Transformers Saturation on Overcurrent Protection Operation. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, 2002.

KOJOVIC, L.J.A. Comparison of different current transformer modeling techniques for protection system studies **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, 2002.

LINDERS, J. R.; BARNETT, C. W.; CHADWICK, J. W.; DRUM, P. R.; KHUNKHUN K. J.; ZOCHOLL, S. E.; KOTHEIMER, W. C.; KOTOS, P. A.; SMAHA, P. B.; WALTON, J. W.; Winston, P.B. Relay Performance Considerations with Low-Ratio CT's and High-Fault Currents. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1995.

MCLAREN, P. G.; LUCAS, J. R.; KEETHIPALA, W. W.; JAYASINGHE, R. P. Improved Simulation Models for Current and Voltage Transformers in Relay Studies, **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1992.

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

Operations Manual for OMICRON-CMC-256. **PC controlled test device for protective relays and transducers**, 2007.

PARKER, A.D.; BIRCHENOUGH, P. T.; MCLAREN, P.G.; Yu, M. Using a Real Time Digital Simulator to Simulate Multiple CT's for Testing Relays in Current Differential Protection Systems. **Developments in Power System Protection, Conference Publication**, 2001.

ROSELLI, M. A. **Correção da saturação de transformadores de corrente via redes neurais artificiais e seus efeitos na proteção de distância**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro (RJ), 2007.

RTDS Technologies. **Manual SET: Real Time Digital Simulation For The Power Industry**, 2009.

SAWKO, P. Impact of Secondary Burden and X/R Ratio on CT Saturation. **Proceedings of the 7th International Conference IEEEIC 2008**, 2001.

SEGATTO, E.C.; COURY, D.V. A power transformer protection with recurrent ANN saturation correction. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, 2005.

SILVEIRA, P. M. and BALDWIN. T. Impact of Fault Current Level on Protection. Electric Power System Research Institute - EPRI, 2007.

SWIFT, G. CT saturation Theory and Calculator. **IEEE Power System Relaying Committe (PSRC)**, pp 1-9, 2001.

TZIOUVARAS, D. A.; MCLAREN, P. G.; ALEXANDER, G.; DAWSO, D.; EZSTERGALYOS, J.; FROMEN, C.; GLINKOWSKI, M.; HASENWINKLE, I.; KEZUNOVIC, M.; KOJOVIC, LJ. A.; KOTHEIMER, B.; KUFFEL, R.; NORDSTROM, J.; ZOCHOLL, S. Mathematical Models for Current, Voltage and Coupling Capacitor Voltage Transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 15, no. 1, pp. 62-72, 2000.

WARRINGTON, A. R., 1978. **Protective Relays Theory and Practice**. 3<sup>a</sup> Ed. Kluwer Academic Pub, 1978.

WRIGHT, A., **Current Transformers**, Chapman & Hall, London, England, 1968.

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

ZOCHOOL, S. E.; BENMOUYAL, G. How Microprocessor Relays Respond to Harmonics, Saturation, and Other Wave Distortions. **Proceedings of the 24th Annual Western Protective Relay Conference**.

---

# *Apêndice*

# Apêndice A – Sinais secundários resultantes do TC do RTDS para os casos analisados no capítulo 6 (considerando os efeitos da assimetria)

As Figuras A1 a A.4 apresentam os sinais secundários instantâneos, resultantes do TC utilizado na metodologia HIL no RTDS, para os quatro casos contidos na Tabela 6.4, onde foram considerados os efeitos da assimetria na corrente de falta e diferentes relações X/R (3, 10,16 e 25) na saturação do TC.

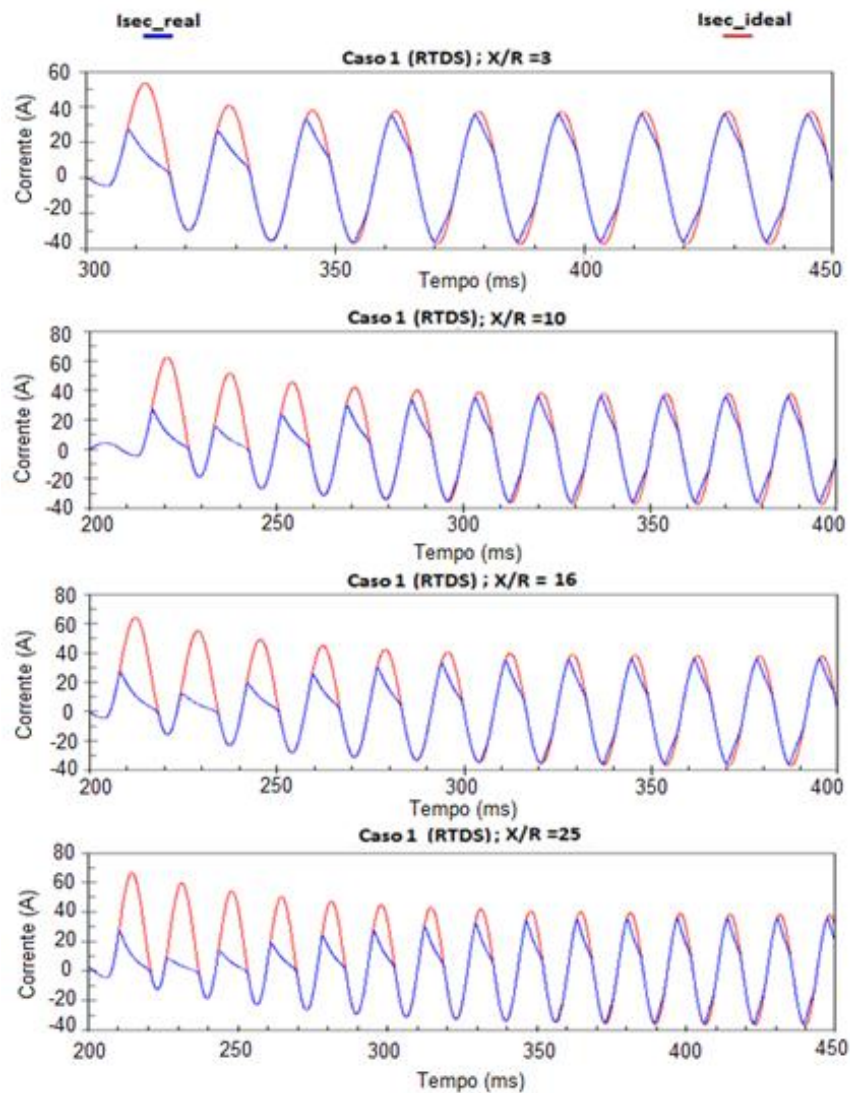
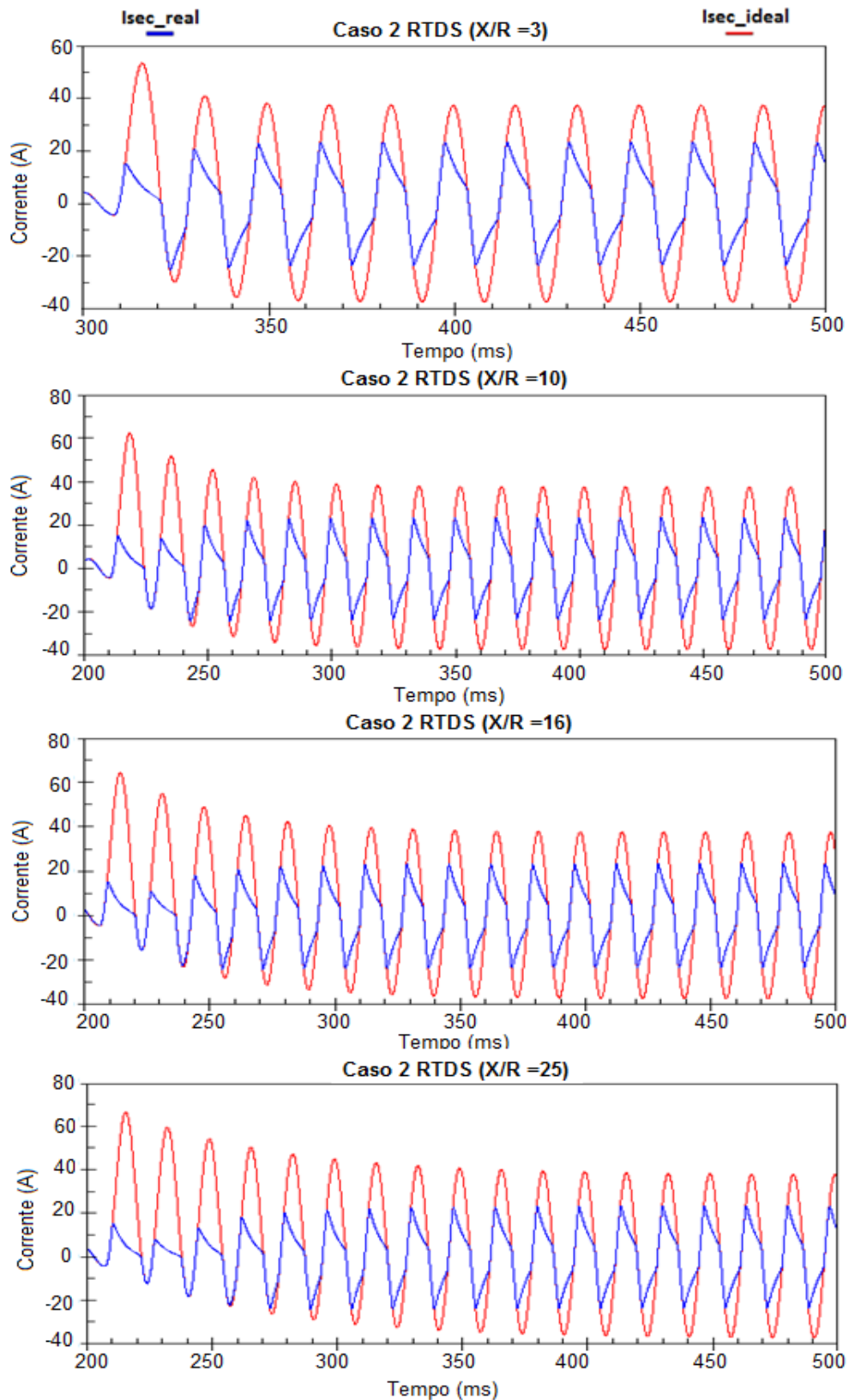
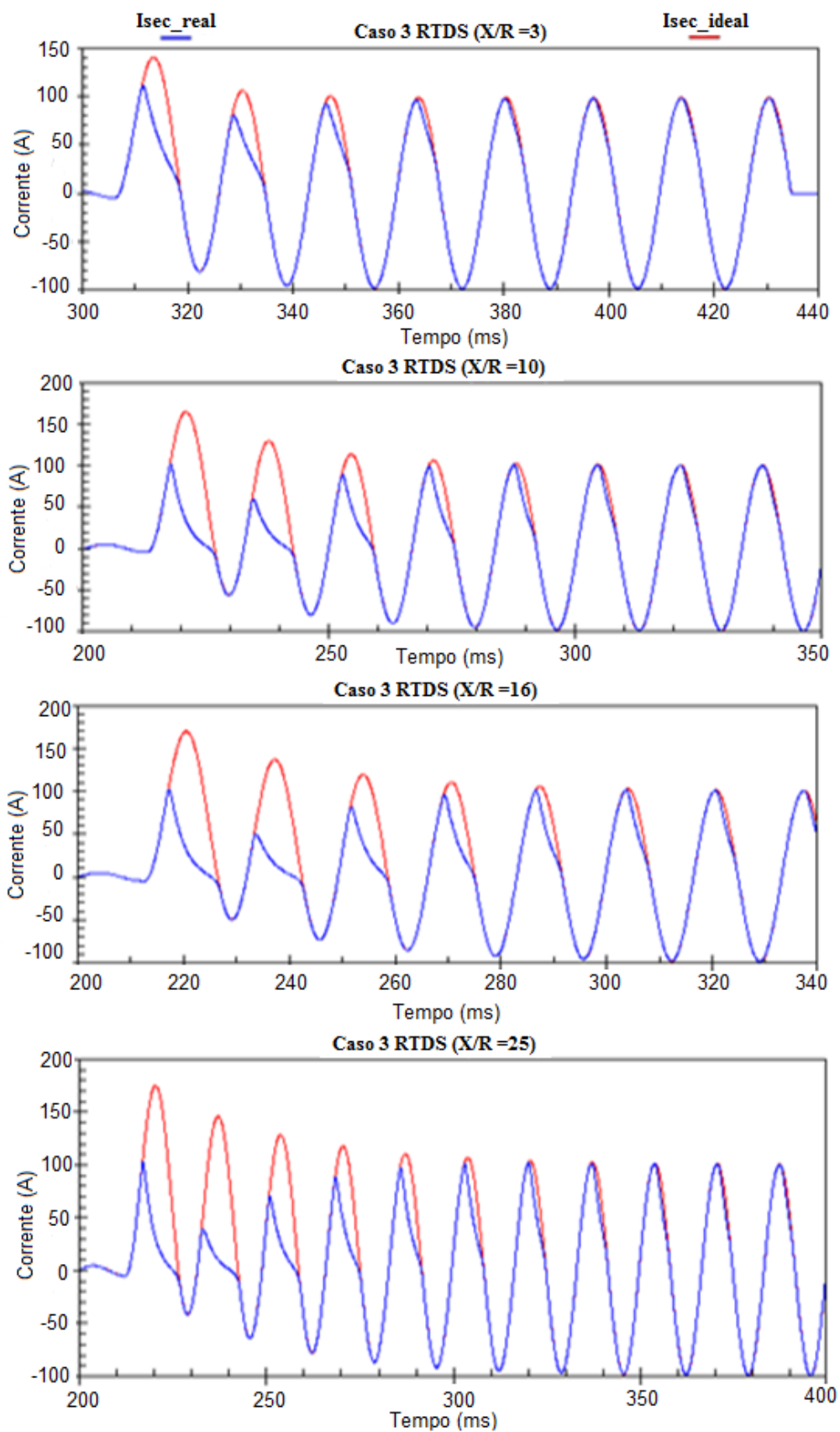


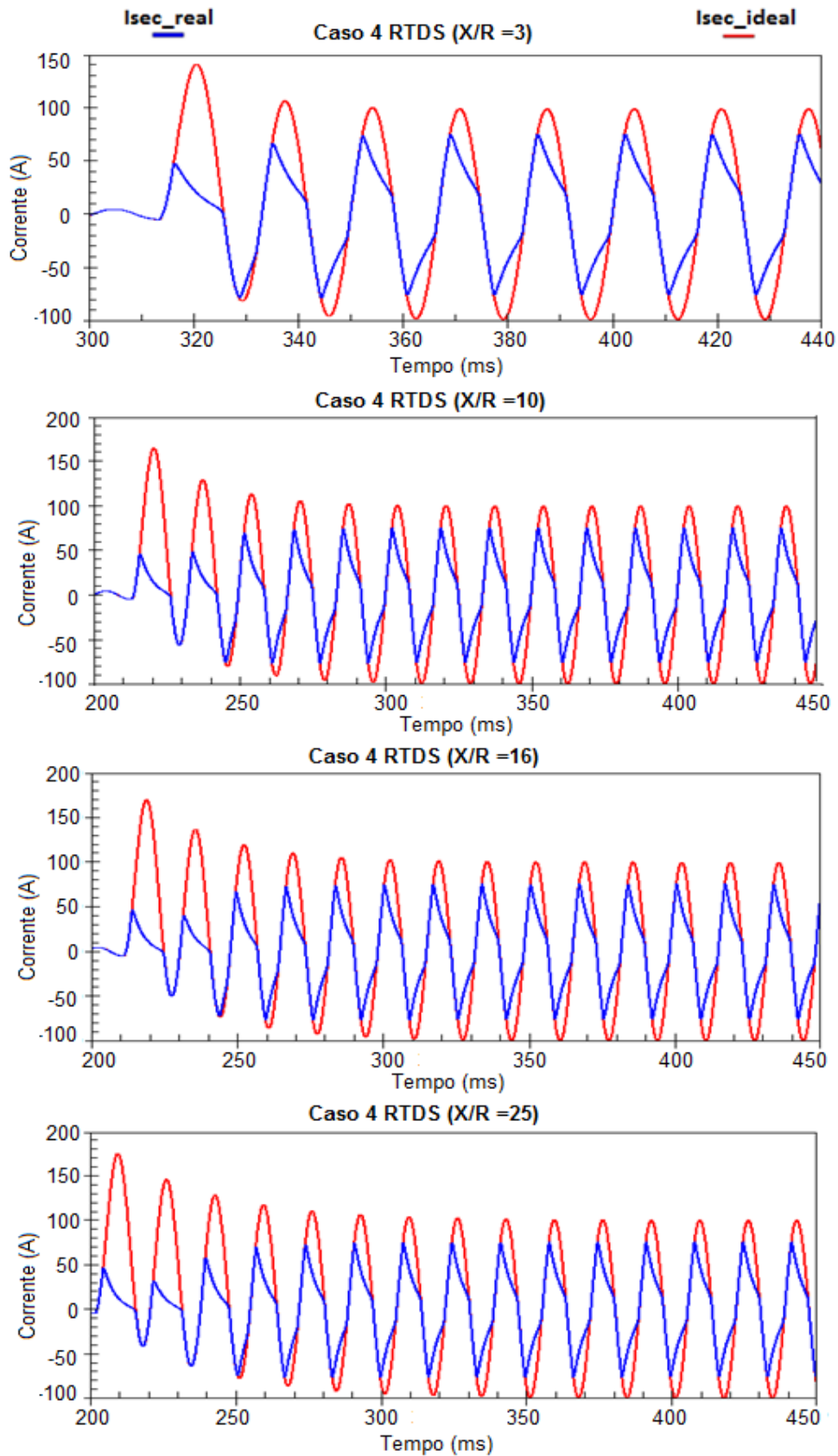
Figura A.1 - Sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 1 indicado na Tabela 6.4.



**Figura A.2 - Sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 2 indicado na Tabela 6.4.**



**Figura A.3 - Sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 3 indicado na Tabela 6.4.**



**Figura A.4 - Sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS, considerando assimetria e relação X/R (3, 10, 16 e 25) para o caso 4 indicado na Tabela 6.4.**



## Apêndice B – Sinais secundários resultantes do TC do RTDS para os casos analisados no capítulo 6 (considerando o efeito do fluxo remanescente)

A Figura B1 apresenta os sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS utilizado na metodologia HIL no RTDS, para os dois casos apresentados na seção 6.4, onde foram considerados os efeitos do fluxo remanescente na saturação do TC.

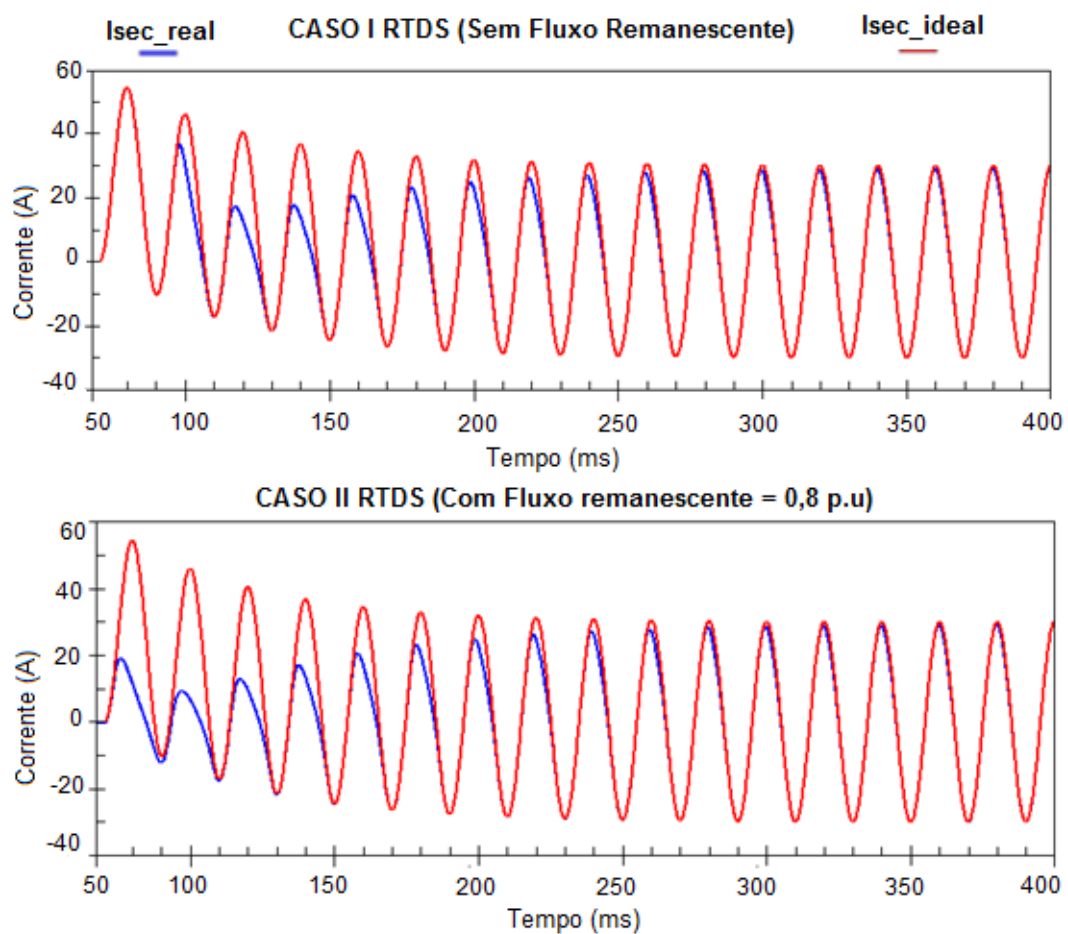


Figura B.1 - Sinais secundários instantâneos, resultantes do TC do RTDS, para os casos sem e com fluxo remanescente discutidos na seção 6.4.

# Apêndice C – Trabalho aceito para publicação na conferência APAP 2011 (*International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*)

## APAP2011

**The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection**  
16<sup>th</sup> to 20<sup>th</sup> October 2011  
Beijing International Convention Center, China

---

1 August, 2011

Mr. /Ms. COELHO Aurélio Luiz Magalhães,  
Federal University of Itajubá

Dear Mr. /Ms. COELHO Aurélio Luiz Magalhães,

**Re: The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, China (APAP2011)**

### Letter of Full Paper Acceptance

On behalf of the Organizing Committee of the International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, we cordially invite you to attend the conference, to be held from 16<sup>th</sup> to 20<sup>th</sup> October 2011 at the Beijing International Convention Center, China.

Your paper has been reviewed and accepted for presentation at the conference:

*Paper Serial Number: 1271*

*Paper Author: COELHO Aurélio Luiz Magalhães1 & SILVEIRA Paulo Márcio*

*Paper Title: CT saturation effects on performance of digital overcurrent relays*

*Mode of Presentation: Oral*

Please proceed to register for the conference via the conference website ([http:// www.apap2011.org](http://www.apap2011.org)). More details on the conference program and accommodation are also posted on the same website.

We look forward to meeting you at the conference.

Yours sincerely,



Professor Xinzhou Dong

Chairman of International Conference on APAP2011

# CT saturation effects on performance of digital overcurrent relays

COELHO Aurélio Luiz Magalhães<sup>1</sup> & SILVEIRA Paulo Márcio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Itajubá, Itajubá 37500903, Brazil;

Received ; accepted

---

In general, modeling the behavior of the core in current transformers (CTs) used for protection and the effects of its operation outside the linear region are commonly reported in literature. The problem in using a mathematical CT model is to obtain the parameters in a particular case in order to implement that model easily, efficiently and accurately. In this sense, a CT model was implemented in MATLAB based on the theory published by the IEEE Power System Relaying Committee (PSRC) to analyze various factors and conditions that can lead to the CT saturation. The current data obtained from the simulation were converted to COMTRADE format to be used in a injection test equipment to verify the overcurrent relay response behavior. A similar analysis was done in the RTDS (Real Time Digital Simulator) performing hardware-in-the-loop simulations (HIL) in order to compare results and validate the tests, which are presented in this paper.

**current transformer saturation, overcurrent relay, hardware-in-the-loop, real time digital simulator**

---

**Citation:** Coelho A L M, Silveira P M. CT saturation effects on performance of digital overcurrent relays.

---

## 1 Introduction

To the extent that electrical power system expand, presenting high levels of fault currents, greater attention is necessary with the protection devices to ensure its proper operation. For this purpose, these devices require an accurate measuring of the current system. Therefore, the current transformers (CTs) are key components in this system, since its provide access to high current of this system through reduced replica on the secondary side, allowing timely and correct identification of faults and disturbances in the network by protective relays [1]. The correct operation of the protection system is therefore dependent on the performance of CTs, which to operate successfully, requires a reproduction as accurate as possible of the current signals during system faults. In opposition to this desirable feature, the cores of the CTs have characteristics of nonlinear excitation and when exposed to high fault currents may retain high levels of flow density leading the core to saturate [1].

Particularly in electrical distribution systems, the saturation of low ratio CTs due to high fault current may cause misoperation of the overcurrent relays. Because this problem, may occur loss of production to various plants or damages critical equipment connected to this system [2].

An important document is the guide IEEE Standard C37.110-2007 [3] that contains some rules for selection of CTs to avoid AC and DC saturation. Many of these recommendations result in increasing the CT's core size. On the other hand, in designs where it is desirable to incorporate CTs as integral part of reclosers and circuit breakers, its dimensions are typically the limiting factor [4].

Therefore, the choice of CTs for these applications is associated with its behavior when exposed to factors that can lead its core to saturate.

For this analysis, CT modeling is important to understand the saturation phenomenon. Many models of iron core were studied and considered by many researchers. Most published papers have considered the use of ATP (Alternative Transients Program) for CT modeling under transient conditions, since accurate and acceptable results were obtained with success [4-8].

The use of high technology equipment to study and analyze the electrical protection devices is becoming more and more common. Nowadays, the market offers modern test platform such as: injection test equipment that generate signals when programmed to simulate situations that happen in a system and Real Time Digital Simulators (RTDS). These simulators have the ability to perform simulations expressing data both on the computer screen and in analogical and digital outputs. These two outputs modes allowing perform tests

---

Coelho, A L M with Power Quality Study Group, UNIFEI, Itajubá, Brazil.

(email: aurelio.eng@gmail.com)

Silveira, P M with Power Quality Study Group, UNIFEI, Itajubá, Brazil.

on real devices, further increasing the credibility of the tests [9].

This paper will investigate the transient behavior of CT's and the factors that can lead its core to saturate. Besides the performance of a digital overcurrent relay under CT saturation is evaluated in two ways. Firstly, a mathematical model of a CT, based on the theory published by the IEEE PSRC [10], has been implemented in MATLAB. By using this model, secondary current waveforms are generated giving rise to a database with different signals. Any of these signals can be converted to COMTRADE format and used in an injection test equipment. In this case, the current signals is transformed in an analogical signal, amplified and injected in a overcurrent relay. The use of a RTDS (Real Time Digital Simulator) is the second way. For this, the overcurrent relay is evaluated performing a hardware-in-the-loop simulations (HIL) in order to compare results of the two methods. Elaborated CTs electrical models are used in the RTDS and the results are compared and validated in both methodologies.

## 2 Current Transformer Modeling

Based on [10], the CT mathematical model implemented in MATLAB is intended to provide a quick indication not only of the existence of CT saturation in a specific application, but also an accurate indication of the actual waveform of the secondary current, in such way that the degree of saturation can be visualized as function of time [10].

In this model, the conditions at the low-end portion of the saturation curve are not represented. The excitation current in the region below the knee-point is a complex combination of magnetizing, hysteresis and eddy current components. These parameters usually are not known in a particular case. If the excitation current reaches into the saturated region, the part of the waveform current in the below-knee-point region has negligible effect on the global solution [10]. Consequently, the hysteresis and eddy currents losses are not represented in this model.

### A CT circuit model

The equivalent circuit for this model is represented in Figure 1. The parameters of circuit represented on Figure 1 are:

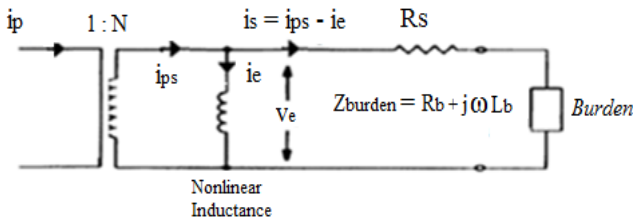


Figure 1 Equivalent circuit of the model.

The parameters of circuit represented on Figure 1 are:

- $i_p$  Instantaneous primary current;
- $i_{ps}$  Instantaneous ideal secondary current;
- $i_s$  Instantaneous real secondary current;
- $i_e$  Instantaneous excitation current;
- $v_e$  Instantaneous excitation voltage;
- $N$  Number of CT turns;
- $R_s$  Winding secondary resistance;
- $R_b$  Burden resistance;
- $L_b$  Burden inductance.
- $\omega$  radian frequency =  $2\pi f$ ;  $f=60\text{Hz}$ .

Through of Kirchoff's Voltage Law is possible to solve the circuit represented in Figure 1 by

$$v_e - (i_{ps} - i_e) \cdot (R_s + R_b) - L_b \cdot \frac{d}{dt} (i_{ps} - i_e) = 0 \quad (1)$$

### B CT excitation curve

The excitation characteristic of the modeled CT is represented by rms values of the excitation current ( $I_e$ ) versus excitation secondary voltage ( $V_e$ ), as illustrated in Figure 2.

In this model, only two parameters need to be extracted from the excitation curve: the slope ( $S$ ) of the saturated section and the saturation voltage ( $V_s$ ) for which the excitation current is ten amps [10]. The reason for choosing the saturation voltage at the point where the exciting current is ten amps is due to the rules defined in IEEE C37.110-2007 [3].

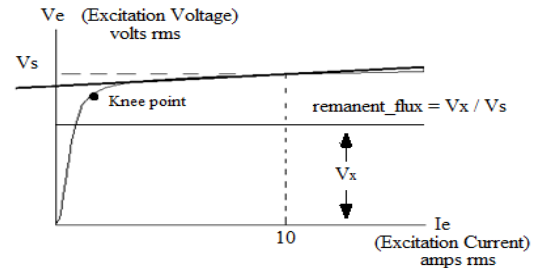


Figure 2 Excitation curve of the model.

The flux-linkages ( $\lambda$ ) versus excitation current ( $i_e$ ) curve has been used to solve the differential equations implied by equation (1).

The remanent flux is defined in per unit, as a ratio between a voltage below the knee point ( $V_x$ ) and the saturation voltage ( $V_s$ ), as shown in Figure 2.

### C CT transient response

For this model the CT transient secondary response is dependent

dependent of the CT rated values entered by the user in the algorithm implemented: burden values, the saturation voltage, number of turns, secondary winding resistance and remanent flux values; and also by the disturbance characteristics such as: level of fault current, the presence of dc component and the system X/R ratio.

Filled these parameters, the ideal ( $i_e = 0$ ) transient response of the secondary current in function of time in response of a short-circuit is given by

$$i_{ps}(t) = \frac{I_p}{N} \sqrt{2} [K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} - \cos(\omega t - \cos^{-1}K)] \quad (2)$$

where  $I_p$  is the rms symmetrical primary fault current and  $K$  determines the features of the current waveform:

- i)  $K = 1$ , when there is asymmetrical component in fault current; In this case  $\tau = \frac{1}{X/R}$  is the constant time of the system;
- ii)  $K = 0$ , when there is only symmetrical component in fault current;

In practice, the excitation current is nonzero and its value determines how much the primary current will be reflected erroneously in the secondary side. In this model this current is given by

$$i_e(t) = A \cdot |\lambda(t)|^5 \quad (3)$$

where  $A$  is a model constant defined in [10].

Considering the excitation current is nonzero, the actual secondary current is then

$$i_s(t) = i_{ps}(t) - i_e(t) \quad (4)$$

To evaluate the equation (4) as a saturation phenomenon, the IEEE C37.110-2007 criteria [3] has been adopted. In according to this standard, AC and DC saturation can be avoided by following equations (5) and (6), respectively.

$$20 \geq i_f \cdot z_b \quad (5)$$

$$20 \geq \left| 1 + \frac{X}{R} \right| i_f \cdot z_b \quad (6)$$

where  $i_f$  is the maximum fault current in per unit of CT rating and  $z_b$  is the CT burden in per unit of standard burden.

### 3 Relay test platform

Here are described briefly the two test systems used in this study to evaluate the effects of CT saturation in the overcurrent response of a digital commercial relay.

#### A System test based on injection test equipment

The values of the transient secondary waveforms obtained from equations (2) and (4) were converted to COMTRADE format [11] using an algorithm implemented in MATLAB. These values were loaded into a OMICRON test equipment.

The OMICRON's Advanced Transplay software has been used to import the COMTRADE data generated from CT modeled in MATLAB. For the intended application, a protective relay, SEL 351-S, manufactured by Schweitzer Engineering Laboratories, has been used to evaluate the overcurrent function under CT saturation. The trip signal of this relay is sent to the OMICRON binary/analog inputs in order to register the time of trip command. The test system is represented in Figure 3.



Figure 3 Test system based on OMICRON test equipment.

#### B Hardware-in-the-loop simulation by RTDS

The same features of the CT modeled in algorithm implemented in MATLAB have been reproduced in a CT model of the RSCAD software [9], which is used to model and run a case. The influence variables on the fault current defined by user in MATLAB were determined on the RSCAD. For this, arrangement and logical of electrical and control components in a distribution system were made to provide similar waveforms in order to check and compare various situations that can lead the CT to saturate. The response of the SEL 351-S relay under these events was evaluated.

The RSCAD is a powerful tool for modeling and simulation power systems in real-time for event analysis [9]. By using the RTDS is not necessary to use injection test equipment, being the behavior relay sizing by hardware-in-the-loop simulation (HIL). In HIL simulation, some of the components of the virtual power system can be replaced by physical devices [12]. In this case, the device is the SEL relay.

Figure 4 shows the HIL simulation scheme used for these tests. The current secondary signals are sent to D/A converters on the RTDS. To extract these signals for the relay, the GTA0 card (Analogue Output Card) was used. In this card the secondary current waveform is reproduced in proportional voltage values in the range of -5 to +5 Vac. Therefore, this card supports low-level signals. Then an

amplifier was used because high-level signal was necessary to saturate the CT core in this research. The analogical signals are then connected to the relay's inputs. The relay senses the secondary currents from the RTDS system, and in case of any fault, it sends out the trip signal to the simulated circuit breakers in the power system modeled in RSCAD. Trip signals from the relay are interfaced to the RTDS via digital input ports. In this research was used the GTFPI card (Front Panel Interface Card).

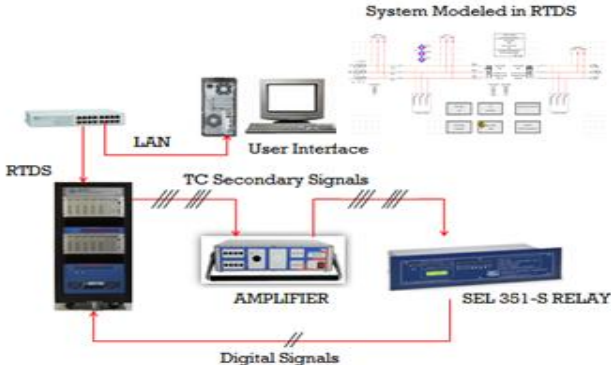


Figure 4 HIL simulation scheme by RTDS.

## 4 Results and discussion

To investigate the CT saturation phenomenon for the two methods, the following influence factors were analyzed: the short circuit level, the presence of dc component and the system X/R ratio, beyond the burden and remanent flux.

The instantaneous (50) and time-overcurrent (51) functions of the SEL 351-S relay are evaluated under these events.

For analyze in RTDS, a distribution system has been modeled in RSCAD. The rated current of this system is approximately 250A. So it was used a CT 300/5A with the following characteristics in according to the IEEE C57.13-2008 [13]:

- Secondary terminal voltage: 100V.
- Standard burden: B1.0 ( $R_b = 0.5 \Omega$ ;  $L_b = 2.3 \text{ mH}$ ).

### A Effects of Symmetrical Fault Current

For this analysis will be shown some cases used to evaluate the effects of the symmetrical fault current and CT burden on the saturation phenomenon in order to check the response of the instantaneous and time-overcurrent functions of the SEL 351-S relay.

The following settings have been used for this relay: (i) pickup of instantaneous function of 15A (ii) IEC Very Inverse Curve, (iii) a pickup of inverse-time 5A and (iv) dial in a value of 0.05.

To verify the relay time operation delay under CT satura-

tion, the difference between the response relay for an ideal and actual secondary current for a particular case has been considered. In general, three cases were selected to be used in this analysis as shown in Table 1.

By IEEE criteria [3] defined in equation (5), in all the cases there are CT saturation. In spite of fault magnitude be higher in case 3, the second case has a factor burden that provides a severe CT saturation.

Figure 5 compares ideal and actual CT secondary current signals for the two methods for case 2.

As a result one can observe that the actual secondary current magnitude is low and its waveform is severely distorted causing the non-operation of the instantaneous function for these conditions in both methods.

For function 51, the relay operated, but with a delay of almost 46 cycles, as shown in Table 1.

Table 1 Overcurrent relay response considering a symmetrical fault and multiple of standard burden on CT saturation.

Cases	MI*	MB*	Relay operation time delay (in cycles)			
			Matlab Model		RTDS Model	
			Relay Function 50	51	Relay Function 50	51
Case 1	7.5	5	0.216	3.674	0.204	3.433
Case 2	7.5	10	-	46.26	-	45.9
Case 3	20	2	0.297	0.42	0.276	0.46

\* MI and MB are the multiple of CT rated current and standard burden respectively.

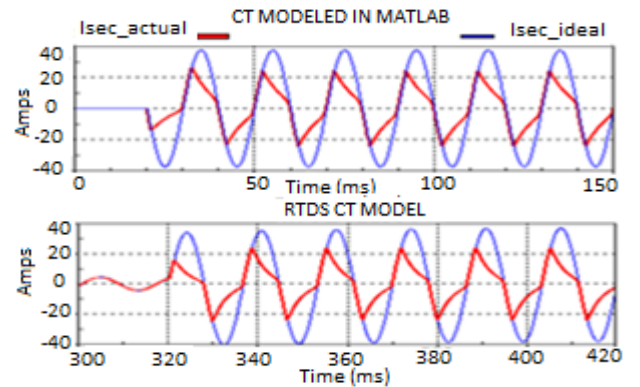


Figure 5 CT saturation due to a high burden value – Case 2 of Table 1 for the two CT models.

### B Effects of Asymmetrical Fault Current

In this evaluation, some cases have been used to check the effects of the asymmetrical fault current on the CT saturation. In all cases shown in Table 2 were used a standard burden and has been adopted a fault current of 20 times the rated CT.

The following settings have been used to evaluate the overcurrent relay response: (i) pickup of instantaneous

function 60A, (ii) IEC Very Inverse Curve, (iii) a pickup of inverse-time 5A and (iv) dial in a value of 0.05.

Different values of X/R ratio have been used to evaluate the relay response as shown in Table 2.

**Table 2** Overcurrent relay response considering an asymmetrical fault on CT saturation.

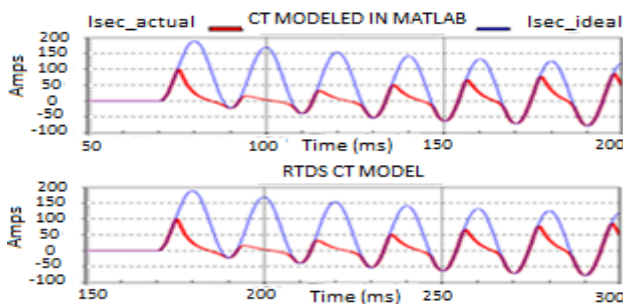
Cases	MI*	X/R	Relay operation time delay (in cycles)			
			Matlab Model Relay Function		RTDS Model Relay Function	
			50	51	50	51
Case 1	20	10	6.03	2.35	5.96	2.16
Case 2	20	16	9.03	3.79	8.89	3.54
Case 3	20	25	14.48	6.26	14.15	6.02

\* MI is the multiple of CT rated current.

By IEEE criteria [3] defined in equation (6), all the cases of the Table 2 there are CT saturation. A sample of simulated secondary current is shown in Figure 6 for the worst case of CT saturation presents in this table, the case 3. In this case, a high fault current is injected to the primary with X/R ratio of 25. The CT is driven into severe saturation within the first cycle and the secondary current remains low and distorted for about six cycles.

The CT secondary waveform response for the two methods are almost identical as represented on Figure 6.

Table 2 presents the relay operation time delay for a SEL overcurrent digital relay. This table shows that, given the same level of fault current, a higher value of X/R ratio result in a lower value seen by the relay in the first cycles and consequently greater delay in its operation in comparison to the ideal case.



**Figure 6** CT saturation due to an asymmetrical fault current - Case 3 of Table 2 for the two CT models

### C Effects of the remanent flux

For this analysis has been considered an asymmetrical fault current, a multiple of standard burden and remanent flux values on the CT saturation to evaluate the overcurrent relay response as shown in Table 3.

Has been adopted a fault current of 7.5 times the CT rated current and a X/R ratio of 25 in all cases on the Table 3.

The SEL 351-S relay has been adjusted with the following settings: (i) pickup of instantaneous function 15A, (ii) IEC Very Inverse Curve, (iii) a pickup of inverse-time 5A and (iv) dial in a value of 0.05.

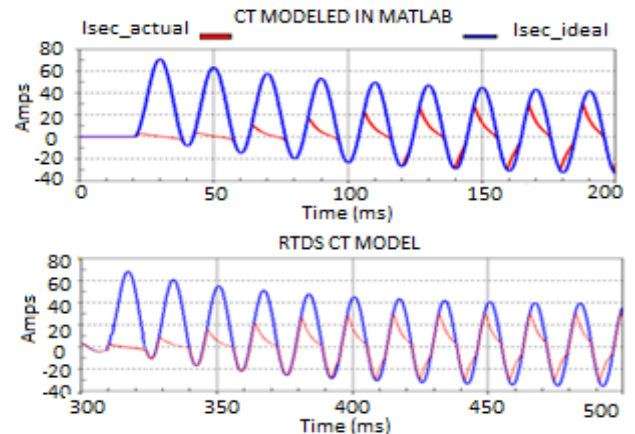
**Table 3** Overcurrent relay response considering an asymmetrical fault, remanent flux and a high burden value.

Cases	MB*	$\lambda_{rem}^*$ (p.u.)	Relay operation time delay (in cycles)			
			Matlab Model Relay Function		RTDS Model Relay Function	
			50	51	50	51
Case 1	5	0.4	7.03	8.493	6.942	8.192
Case 2	7	0.8	-	25.10	-	24.72
Case 3	6	0.9	9.17	16.59	8.94	16.23

\* MI is the multiple of standard burden and  $\lambda_{rem}$  is the remanent flux in p.u.

By IEEE criteria [3] defined in equation (6), in all the cases of the Table 3 there are CT saturation. A sample of simulated secondary current for the two methods is shown in Figure 7 for the worst case of CT saturation presents in this table, the case 2. In this case, due high burden value, the actual secondary current magnitude is low and its waveform is very distorted causing the non-operation of the instantaneous function for these conditions in both methods. Observed in Figure 7 that CT is driven into severe saturation within the first cycles due the remanent flux and high X/R ratio value.

For function 51, the relay operated in all cases of Table 3, but with a greater delay in comparison to the ideal case, as shown in a curve represented by Figure 8.



**Figure 7** CT saturation due to a high burden and remanent flux value – Case 2 of Table 3 for the two CT models

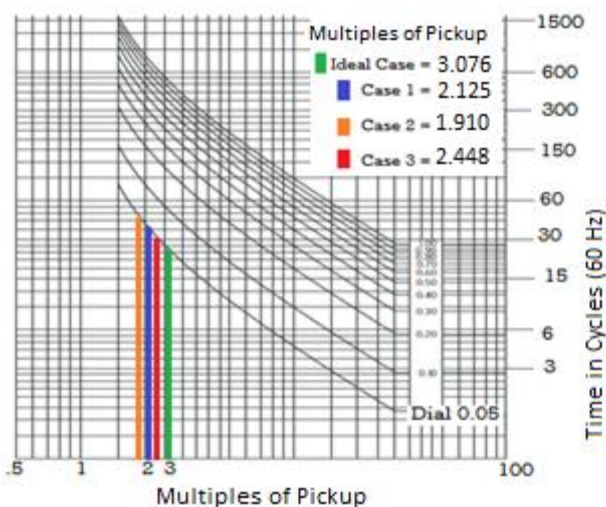


Figure 8 Time-overcurrent relay response under CT saturation – Cases of Table 3.

## 5 Conclusion

An efficient and accurate CT model was implemented in MATLAB based on theory published by IEEE PSRC to evaluate the CT transient response and its effects on overcurrent instantaneous and time-overcurrent functions response of a commercial relay. This model showed a satisfactory response when compared with the transient behavior of RTDS CT model configured with the same parameters, presented similar CT signals response. The small difference observed in the relay time operation delay in both methods is acceptable because the mathematical CT models are not equals. However in two methods was noted the influence of saturation in the overcurrent relay response.

Considering only low levels of symmetrical fault current and standard burden values the relay operation time delay was very short and did not cause problem in the relay operation under CT saturation.

However, the overcurrent relay response was severely affected by CT saturation when its circuit as exposed to a high levels of fault current, presence of dc component in a fault current and a high value of ratio X/R, multiples of standard burden and remanent flux in the core.

This paper shows that CT performance for a given application depends on system conditions and be in accord with the criteria defined by IEEE standard C37.110-2007 to evaluate saturation effects so check the protective relays purposes.

The HIL simulation by RTDS proved to be a fast and effective method for testing in relays, and also allows greater repeatability of the tests and a real-time analysis of waveforms distorted by CT saturation.

This work was supported by the CAPES and FAPEMIG, Brazil.

- 1 Segatto, E.C.; Coury, D.V. A power transformer protection with recurrent ANN saturation correction. Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE , vol., no., pp. 1341- 1346 Vol. 2, 12-16 June 2005.
- 2 El-Amin, I.M.; Al-Abbas, N.H. Saturation of Current Transformers and its Impact on Digital Overcurrent Relays. Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES , vol., no., pp.1-6, 15-18 Aug. 2006.
- 3 IEEE C37.110-2007. IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes, 1996.
- 4 Kojovic, L.J.A. Impact of Current Transformers Saturation on Overcurrent Protection Operation. Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Volume: 3, pp. 1078-1083, July 2002.
- 5 Kezunovic, M.; Fromen, C. W. and Phillips, F., Experimental Evaluation of EMTP Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 9, No.1, pp. 405-413, 1994.
- 6 Guerra, F. C. F.; Mota, W. S. Current transformer model, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 187- 194, 2007.
- 7 Lucas, J. R.; McLaren, P. G.; Keethipala, W. W. and Jayasinghe, R. P. Improved Simulation Models for Current and Voltage Transformers in Relay Studies, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 152-159, 1992.
- 8 Kojovic, L.J.A. Comparison of different current transformer modeling techniques for protection system studies Power Engineering Society Summer Meeting. IEEE. v. 3, p.1084-1089, 2002.
- 9 RTDS Technologies, <http://www.rtds.com/index.html>.
- 10 Swift, G. CT Saturation Theory and Calculator. IEEE PSRC, pp 1-9, June 2001.
- 11 IEEE C37.111. IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Powers Systems, 1999.
- 12 Chenfeng Zhang, Vamsi K Vijapurapu, Anurag K Srivastava, Noel N. Schulz, Jimena Bastos and Rudi Wierckx. Hardware-in-the-Loop Simulation of Distance Relay Using RTDS. Summer Simulation Multiconference, San Diego, CA United States, 2007.
- 13 IEEE C57.13. IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers, 2008.