

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

**PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE
POTÊNCIA E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS
ELÉTRICOS POR MEIO DA TRANSFORMADA
WAVELET DISCRETA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Jeferson Prates Marques

Santa Maria, RS, Brasil

2014

PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS POR MEIO DA TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

por

Jeferson Prates Marques

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

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

Santa Maria, RS, Brasil

2014

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

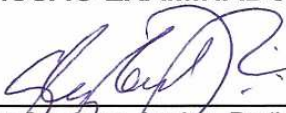
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E
CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS POR MEIO DA
TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA**

elaborada por
Jeferson Prates Marques

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

COMISSÃO EXAMINADORA:



Ghendy Cardoso Junior, Dr.(UFSM)
(Presidente/Orientador)



Raidson Jenner Negreiros de Alencar, Dr.(IFPA)



Adriano Peres de Moraes, Dr.(CTISM)

Santa Maria, 20 de Fevereiro de 2014.

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Prates Marques, Jeferson
Proteção de Transformadores de Potência e Classificação de Transitórios Elétricos por meio da Transformada Wavelet Discreta / Jeferson Prates Marques.-2014.
92 p.; 30cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2014

1. Proteção de Transformadores de Potência 2. Transformada Wavelet 3. Corrente de Inrush I. Cardoso Junior, Ghendy II. Título.

©2014

Todos os direitos autorais reservados a Jeferson Prates Marques. A reprodução de partes ou de todo este trabalho só poderá ser feita mediante autorização do autor.

Endereço: Rua Pedro Londero, 170, apt 101, Bairro Nsa. Sra. Das Dores, Santa Maria, RS, 97095-530

Fone: (+55) 55 9606-4716; E-mail: jefersonjpm.ee@gmail.com

Dedicatórias

À minha querida mãe por ter me educado e ensinado a ir atrás dos meus objetivos, não importando o quão difíceis possam parecer.

Ao meu irmão pelo apoio, conselhos e incentivos durante a caminhada deste desafio.

À minha querida noiva Vanessa pelo seu amor e apoio incondicional em todos os momentos.

À minha família pelo amor e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda a minha família, pois são os pilares de minha educação e conquistas.

Agradeço à UFSM e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela oportunidade dada em trilhar este objetivo.

Ao professor Ghendy Cardoso Jr. pela orientação dada durante este trabalho.

Agradeço ao colega Carlos Lázaro Menco pelas satisfatórias conversas técnicas e profissionais, além do apoio em publicações deste trabalho.

Agradeço a todos os colegas do CEESP pela receptividade, apoio e amizade.

Agradeço ao Me. Eng. Alexandre Paciencia Bernardes pela ajuda dada, mesmo sem me conhecer, para a obtenção dos *cards* de simulação do ATP.

Agradeço a todos os amigos que me apoiaram e ficaram felizes pelas minhas conquistas, mesmo quando muitas vezes ausentei-me das junções e confraternizações.

Enfim, agradeço à todos que de alguma maneira ajudaram-me a chegar até aqui.

Muito Obrigado!!!

"Sem objetivos bem definidos, somente por acaso chegaremos a algum lugar".

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS POR MEIO DA TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

Autor: Jeferson Prates Marques
Orientadora: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.
Data e Local da defesa: Santa Maria, 20 de Fevereiro de 2014.

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um algoritmo para classificação de transitórios elétricos em transformadores de potência, para fins de proteção. Inicialmente foram analisados os principais transitórios associados aos transformadores de potência, tendo um foco especial na corrente de magnetização que surge durante a energização do equipamento, conhecida como corrente de *inrush*. Dentre os transitórios estudados, as correntes de *inrush* são as que apresentam maior dificuldade de identificação e discriminação por parte da proteção diferencial, devido a sua alta magnitude de pico. Em um segundo momento, foi desenvolvido um sistema teste implementado no software ATP para a simulação das diversas situações de operação do transformador de potência, sendo obtidos dados de correntes a partir dos TCs para análise. Após conhecer o problema e implementar um sistema teste para a obtenção dos dados, desenvolveu-se um algoritmo baseado nas últimas amostras dos coeficientes de detalhes, chamada de Sinais de Detalhes, provenientes da decomposição dos dados de correntes diferenciais das fases por meio da Transformada Wavelet Discreta. A metodologia desenvolvida tem como objetivo melhorar o sistema de proteção do transformador, tornando-se uma alternativa eficiente para a identificação de transitórios.

Palavras-chave: Proteção de transformadores de potência, Proteção diferencial, Correntes de Inrush, Transformada Wavelet Discreta.

ABSTRACT

Master of Science Dissertation
Electrical Engineering Graduation Program
Federal University of Santa Maria

POWER TRANSFORMERS PROTECTION AND CLASSIFICATION OF ELECTRIC TRANSIENTS THROUGH THE DISCRETE WAVELET TRANSFORM

Author: Jeferson Prates Marques
Advisor: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.
Date e Local of Presentation: Santa Maria, 20 de February de 2014.

This dissertation presents the development of an algorithm for classifying electrical transients in power transformers for protection. Initially the main transient involving power transformers were analyzed, with a special focus on the magnetizing current that occur during energizing equipment, known as inrush currents. Among the studied transient, current inrush are those that present greater difficulty in identification and discrimination by the differential protection, due to its high peak magnitude. In a second moment, was developed a test system implemented in ATP / EMTP software for the simulation of different operating situations of the power transformer, current data being obtained from TCs for analysis. After known the problem and implement a test for acquisition system, we developed an algorithm based on the last samples of the detail coefficients, called Details Signals, from the decomposition of the data of differential phase current using the Discrete Wavelet Transform. The methodology has the objective improve the system for protection of the transformer, becoming one efficient alternative for the identification of transients.

Keywords: Protection of Power Transformers, Differential Protection, Inrush Currents, Discrete Wavelet Transform.

SUMÁRIO

Resumo	8
Abstract.....	9
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Considerações gerais	13
1.2 Objetivo	13
1.3 Motivação	14
1.4 Estado da Arte	15
1.5 Estrutura da dissertação.....	18
2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES	20
2.1 Considerações gerais	20
2.2 Proteção Diferencial.....	20
2.3 Relé Diferencial Percentual	22
2.4 Transitórios em transformadores	24
2.4.1 Corrente de Magnetização (“Corrente de Inrush”).....	24
2.4.2 Sobre-excitação do transformador	28
2.4.3 Saturação dos transformadores de corrente (TC).....	29
2.4.4 Remoção de faltas próximas ao transformador	30
2.4.5 Rejeição de carga	30
2.4.6 Energização solidária (<i>Sympathetic Inrush</i>).....	31
2.5 Considerações finais	32
3 CONCEITOS SOBRE TRANSFORMADA WAVELET.....	33
3.1 Considerações gerais	33
3.2 Transformada Wavelet	33
3.2.1 Transformada Wavelet Contínua	35
3.2.1.1 Escala.....	35
3.2.1.2 Translação	36
3.2.2 Transformada Wavelet Discreta.....	36

3.2.3	Transformada Wavelet Discreta através de banco de filtros	37
3.2.3	Famílias de Wavelets	39
3.2.3.1	Wavelet de Haar.....	39
3.2.3.2	Wavelet Biortogonais.....	40
3.2.3.3	Wavelet de Daubechies.....	41
3.2.3.4	Wavelets tipo Symlets.....	41
3.2.3.5	Wavelets tipo Coiflets	42
3.3	Considerações Finais	43
4	ALGORITMO PROPOSTO.....	44
4.1	Considerações gerais	44
4.2	Desenvolvimento do Algoritmo	44
4.7	Considerações finais	52
5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SEP.....	53
5.1	Considerações gerais	53
5.2	Introdução ao ATP.....	53
5.3	O Sistema Elétrico Implementado.....	55
5.3.1	Gerador (Fonte Equivalente)	56
5.3.2	Transformador de Potência.....	57
5.3.3	Transformadores de Corrente (TC).....	59
5.3.4	Linha de Distribuição.....	61
5.3.5	Carga	62
5.4	Situações Simuladas.....	63
5.5	Pré-processamento dos Sinais	65
5.5.1	Filtragem do sinal.....	66
5.5.2	Correção da Defasagem Angular.....	66
5.5.3	Componente de Sequência Zero.....	67
5.6	Considerações finais	69
6	SIMULAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS.....	70

6.1	Considerações gerais	70
6.2	Energização do Transformador (“<i>inrush</i>”).....	70
6.3	Energização com Falta Interna.....	72
6.4	Energização Solidária (“<i>Sympathetic Inrush</i>”)	74
6.5	Falta Interna	76
6.6	Falta Interna dentro da região protegida.....	78
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
7.1	Conclusões	83
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	84
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	ANEXO A.....	92

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) estão sujeitos a situações de surtos e transitórios que, frequentemente, implicam em prejuízos e transtornos para os operadores do sistema e seus usuários. Quando da ocorrência de distúrbios indesejáveis, é de grande importância a detecção rápida por parte dos sistemas de proteção para evitar maiores danos.

Os transformadores de potência são equipamentos extremamente importantes para o funcionamento do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Com isso, devido a sua importância e alto valor financeiro necessitam de um sistema de proteção confiável, seguro e rápido para evitar prejuízos durante situações de curtos-circuitos.

A proteção diferencial (ANSI 87) é a principal metodologia de proteção aplicada em transformadores de potência acima de 10 MVA devido ao seu princípio simples de operação e sensibilidade. Entretanto, essa proteção apresenta problemas na identificação e distinção entre as correntes de *inrush* e faltas internas, o que pode implicar em disparo indevido por parte da proteção.

Com isso, nos últimos anos diversos trabalhos têm sido realizados no sentido de melhorar o sistema de proteção de transformadores de potência, cada qual utilizando diferentes técnicas matemáticas, principalmente para a correta distinção das situações de energização e de faltas internas.

1.2 Objetivo

Propor um algoritmo para proteção e classificação de transitórios em transformadores de potência fundamentado no princípio da Transformada Wavelet Discreta (TWD) da família Daubechies (“db4”). Com os coeficientes de detalhes provenientes da decomposição dos sinais das correntes diferenciais das fases é possível identificar e discriminar os transitórios ocorridos no transformador. O

método é viabilizado pelo fato dos coeficientes de detalhes apresentarem uma variação próxima de zero em situações de *inrush*, e em situações de falta interna uma variação brusca.

1.3 Motivação

Cada vez mais a demanda por energia elétrica tem aumentado no Brasil, reflexo de alguns fatores como o crescimento das indústrias, aumento do poder aquisitivo, economia, eventos esportivos que irão ocorrer, etc. Com isso, garantir o funcionamento do SEP torna-se mais complicado e preocupante.

Segundo notícia publicada no site de notícias *Jornal da Energia*, em 11 de março de 2013, o “*Sistema Interligado Nacional (SIN) teve mais de 2 mil perturbações por ano entre 2008 e 2012, diz ONS.*” Conforme as informações, em 11,8% dos casos, houve corte de carga, sendo 3% interrupção superior a 100MW, 0,4% corte superior a 500MW e 0,2% superior a 1GW. De acordo com o ONS, as principais causas das perturbações são: em linhas de transmissão devido a condições climáticas adversas e queimadas; em transformadores e barramentos devido a “equipamentos/acessórios”; seguido de falhas humanas (JORNAL ENERGIA, 2013).

No que diz respeito aos transformadores de potência, a metodologia convencional de proteção (restrição pela 2ª harmônica) utilizada atualmente pode apresentar imprecisões que podem comprometer a correta identificação e distinção das situações de transitórios ocorridos durante sua energização, conhecidas como correntes de *inrush*.

Diversas técnicas têm sido propostas para a melhoria do desempenho da proteção diferencial, porém em sua maioria mostram-se complexas e pouco robustas, o que inviabiliza a sua aplicação prática. A partir disto, o desenvolvimento de uma metodologia que supra tais requisitos torna-se um desafio a ser vencido.

Desta forma, o desenvolvimento de uma metodologia simples, eficiente e robusta que possa ser aplicada ao sistema elétrico é justificada e alvo de muitos estudos.

1.4 Estado da Arte

Diversos trabalhos tem sido realizados no sentido de discriminar as situações de correntes de magnetização (*inrush*) de faltas internas em transformadores de potência e com isso melhorar o sistema de proteção. A seguir serão apresentados alguns desses trabalhos. É possível perceber que são utilizadas diferentes técnicas e metodologias matemáticas.

BAOMING, ALMEIDA et al. (2005) propuseram um algoritmo que utiliza a indutância instantânea equivalente (IIE) para distinguir as condições de correntes de *inrush* e faltas internas em transformadores de potência. Essa é derivada de uma diferença da permeabilidade magnética devido a saturação e não saturação do núcleo do transformador em situações de *inrush* e falta interna. Os autores propuseram dois critérios de análise, um no domínio do tempo e outro no domínio da frequência, chamados de método direto e indireto, respectivamente. Utilizando o método indireto, os autores identificaram que durante operação normal e situações de faltas internas, a componente de frequência fundamental é quase zero. No entanto, em situações de correntes de *inrush* a componente de frequência fundamental da IIE apresenta uma drástica variação, podendo assim distinguir as situações. No método direto, foi utilizada uma análise da variação de IIE para identificar e distinguir as situação de *inrush* e faltas internas. Em situações de operação normal e faltas internas o núcleo do transformador não está saturado o que resulta em uma IIE aproximadamente constante. Quando na situação de *inrush*, o núcleo alterna entre as situações de saturado e não saturado fazendo com que IIE varie drasticamente. Em ambos os métodos foi proposto um limiar de ativação para distinguir as situações.

RAHMATI e PASAND (2008) propuseram um algoritmo que aplica a Transformada Wavelet na corrente diferencial, de modo a extrair as características da forma de onda. Segundo os autores, quando da ocorrência de *inrush*, no momento do chaveamento, o valor instantâneo da corrente diferencial tem uma taxa de variação de declividade reduzida. No entanto, em situações de faltas internas essa taxa de variação de declividade é grande no momento inicial, decrescendo rapidamente. Com isso, foi utilizado o intervalo de tempo até ser alcançada a

amplitude máxima do sinal no intervalo de frequência de 312,5 – 625 Hz, representando o coeficiente de detalhe D4 da decomposição da Transformada Wavelet, para distinguir os transitórios simulados.

O trabalho apresentado por KUMAR, GUPTA e SINGH (2008) utiliza Redes Neurais Artificiais (RNA) como classificador. O algoritmo baseado em RNA monitora as diferentes condições de operação do transformador, e ao detectar uma falta interna, emite um sinal de operação para a proteção. Os autores utilizam a ferramenta Simulink do Matlab para implementar o sistema elétrico e também o algoritmo.

JIALE et al. (2009) propõem um algoritmo para identificação da indutância de excitação de transformadores de potência trifásicos com conexão estrela-triângulo. O algoritmo proposto é baseado no circuito equivalente do transformador, sendo que a influência das correntes que circulam pelos enrolamentos do delta são eliminadas, permitindo que a indutância de excitação seja calculada usando somente as correntes de linha do delta. O trabalho proposto mostrou ser capaz de diferenciar situações de correntes de *inrush* e condições de faltas no transformador, podendo ser aplicado na proteção de transformadores de potência estrela-triângulo.

LU, TANG et al. (2009) apresentaram um trabalho que faz uso da morfologia matemática para discriminar as situações de *inrush* e faltas internas. O esquema proposto decompõe os sinais de correntes em níveis de multiresolução baseado em análise e síntese de operadores de morfologia matemática, tais como dilatação, erosão, abertura e fechamento. A metodologia propõe um Novo Gradiente Morfológico através da aplicação das operações de abertura e fechamento no gradiente morfológico tradicional. Com isso, é possível extrair as mudanças súbitas dos sinais analisados. Segundo os autores, o método é capaz de discriminar as situações de *inrush* e faltas internas mesmo em caso de *inrush* com baixo nível de harmônicos de segunda ordem, e também, em faltas internas com alto nível de segunda harmônica.

O trabalho de BRANCO (2009), faz uso de duas teorias amplamente utilizadas, a Transformada Wavelet e a Lógica Fuzzy. Essas foram integradas em um algoritmo para a detecção e classificação de diferentes transitórios em

transformadores de potência. O algoritmo é capaz de detectar e diferenciar situações como: correntes de *inrush*, faltas internas, sobre excitação e energização solidária. Os autores utilizam Transformada Wavelet Packet para extrair as informações das componentes harmônicas de 2ª e 5ª ordem do sinal da corrente diferencial. A partir disso, é utilizada a Lógica Fuzzy para identificar e discriminar as situações transitórias.

OLIVEIRA (2009) em seu trabalho utiliza a Transformada Wavelet Discreta para a decomposição dos sinais da corrente diferencial em várias faixas de frequência. A partir da decomposição, o algoritmo proposto analisa a variação da energia espectral dos coeficientes de detalhe da wavelet. Com isso, é possível discriminar as situações de faltas internas e correntes de *inrush*. O autor realizou testes com diferentes tipos de wavelets mãe, sendo que a wavelet de Daubechies obteve um melhor desempenho nas situações simuladas.

NARENDRA et al (2011) descrevem dois novos princípios baseados na comparação do ângulo diferencial de fase e na taxa de variação da corrente diferencial para a distinção de faltas internas e externas na proteção diferencial de barras e transformadores. O trabalho faz um comparação entre um método tradicional de relés, método das duas curvas, e o algoritmo proposto. Conforme mencionado no trabalho, durante faltas externas os ângulos de fase são maiores que 90° , e durante faltas internas os ângulos de fase são menores que 90° . A partir disso, o algoritmo monitora os ângulos de fase, sendo que, caso os ângulos sejam maiores que 90° o algoritmo reconhece como uma falta externa e bloqueia a operação do relé. Caso os ângulos sejam menores que 90° o algoritmo identifica como falta interna e permite a operação do relé de proteção. Os autores propuseram uma função adicional ao algoritmo baseada na variação da corrente de operação e da corrente de restrição. Segundo eles, durante faltas interna, a razão de mudança da corrente de operação é maior que a da corrente de restrição, e para faltas externas, a variação da corrente de restrição é maior que da corrente de operação. Os dois princípios são utilizados juntos para prover maior segurança na tomada de decisão das situações de transitórios em transformadores. Os resultados mostraram que o algoritmo é capaz de detectar as situações de falta interna e falta externa mesmo com correntes distorcidas.

No trabalho feito por POTHISARN e NGAOPITAKKUL (2012), é mostrada uma análise do comportamento de faltas internas e faltas externas em transformadores de potência trifásicos de dois enrolamentos utilizando Transformada Wavelet Discreta. Os autores utilizam a TWD para decompor os sinais das correntes diferenciais e da corrente de sequência zero para extrair os coeficientes de detalhes das mesmas. Uma análise da variação dos coeficientes de detalhes para faltas internas e externas, mostrou que os valores dos sinais aumentam em situações de pós-falta quando comparado com situações de pré-falta, tanto para as correntes diferenciais como para a corrente de sequência zero. No entanto, segundo os autores, os valores dos coeficientes de detalhes para as situações de falta interna e externa são explicitamente distintos.

ALENCAR e BEZERRA (2013) apresentaram uma metodologia baseada no gradiente da corrente diferencial. O método consiste em calcular o ângulo do vetor gradiente ao longo da curva da corrente diferencial na janela de dados. Como as correntes de *inrush* apresentam uma assimetria em relação ao eixo do tempo, tendo apenas um semi-ciclo completo, é possível distinguir as correntes de *inrush* de faltas internas. Durante as situações de faltas internas o módulo do gradiente e o ângulo apresentam valores elevados, já na situação de *inrush*, o módulo do gradiente e o ângulo apresentam valores reduzidos ou quase nulos. Com isso, através do cálculo do desvio padrão do ângulo do gradiente consegue-se distinguir os transitórios no transformador de potência, pois em situações de *inrush* o desvio é mais elevado, e em faltas internas o desvio padrão apresenta valores reduzidos. Os autores obtiveram bons resultados referentes a discriminação das condições de *inrush* e faltas internas.

1.5 Estrutura da dissertação

No Capítulo 2 deste trabalho é apresentada uma introdução sobre Proteção Diferencial de Transformadores, mostrando seu funcionamento e características de operação. Os principais transitórios que afetam o funcionamento dos

transformadores de potência, prejudicando a operação da proteção diferencial, são debatidos nesse mesmo capítulo.

Já no Capítulo 3, conceitos sobre a Transformada Wavelet são apresentados, assim como as suas derivações contínua e discreta. Ainda nesse capítulo é mostrada as características de implementação da Transformada Wavelet Discreta através de banco de filtros, assim como algumas das famílias de wavelets.

O algoritmo proposto neste trabalho é apresentado no Capítulo 4. A idéia do desenvolvimento da metodologia, as características analisadas e seu funcionamento são debatidos passo-a-passo.

O Capítulo 5 trata sobre a parte de Simulação Computacional do SEP, detalhando os componentes utilizados para a simulação do sistema elétrico. Seguindo ainda esse capítulo, são apresentadas as situações simuladas para teste do algoritmo, assim como a etapa de pré-processamento dos dados provenientes das simulações realizadas.

O Capítulo 6 é dedicado a apresentar algumas das situações transitórias simuladas e seus resultados a partir da aplicação do algoritmo.

Já no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho, assim como as sugestões para trabalhos futuros.

2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES

2.1 Considerações gerais

Neste capítulo serão abordados os conceitos relacionados a proteção diferencial de transformadores de potência. Dentre os itens citados está o princípio de funcionamento do relé diferencial percentual. Os principais transitórios em transformadores de potência serão apresentados na seção 4, definindo os surtos que afetam a operação dos sistemas de proteção.

2.2 Proteção Diferencial

A proteção diferencial (ANSI 87) é a filosofia de proteção amplamente utilizada em transformadores de potência acima de 10 MVA. Essa filosofia também é aplicada em barramentos, grandes motores e geradores, entre outros.

A metodologia baseia-se na diferença entre as correntes do primário e secundário do transformador. As correntes são obtidas a partir de Transformadores de Correntes (TCs) conectados em série com o ramo primário e secundário a ser protegido, como mostra a Figura 1. Nesta, $N_p:N_s$ são as relações de transformação entre o primário e o secundário do transformador a ser protegido, $1:n_1$ e $1:n_2$ são as relações de transformação do TC primário e secundário, respectivamente. As bobinas de restrição são representadas por B_{R1} e B_{R2} , BO é a bobina de operação do relé diferencial e V_P e V_S são as tensões primária e secundária do transformador.

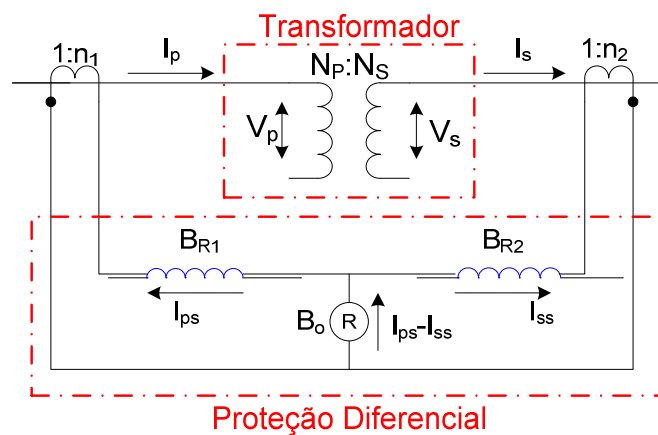


Figura 1: Proteção diferencial para transformadores.
Fonte: Adaptado de BARBOSA, 2010.

A corrente diferencial é obtida por meio da diferença entre as correntes secundárias do TCs (I_{PS} e I_{SS}). Essa corrente diferencial é monitorada pelo relé diferencial que atua desconectando o transformador de força a partir de um limiar estipulado. Quando o transformador está em condições normais de operação, a corrente diferencial é praticamente zero e conseqüentemente restringe a operação do relé diferencial. No entanto, quando ocorrem faltas internas ao transformador surgem correntes que fazem com que haja um desequilíbrio entre as correntes I_{PS} e I_{SS} ocasionando a atuação do relé diferencial de proteção desconectando o transformador do SEP. Na Figura 2 são mostrados os fluxos das correntes para os casos de operação normal e de falta interna no transformador.

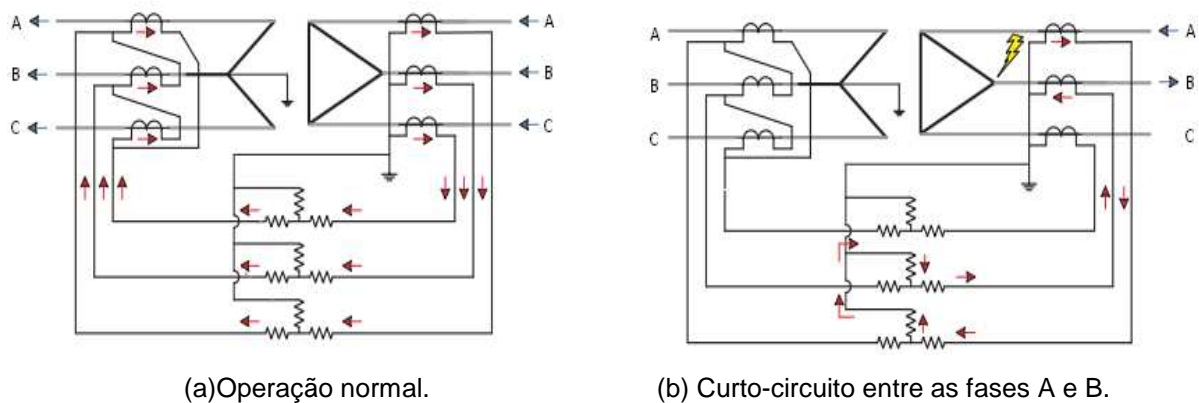


Figura 2: Circulação de correntes no sistema de proteção diferencial.
Fonte: retirado de BARBOSA, 2010.

A Figura 2(a) mostra que as correntes que entram na zona de proteção tem que ser as mesmas que saem, fazendo com que não circule corrente na bobina de operação, evitando assim a atuação da proteção. Na Figura 2(b) percebe-se uma circulação de corrente pelas bobinas de operação das fases A e B, o que provocará a atuação do relé de proteção e a desconexão do transformador (BARBOSA, 2010).

2.3 Relé Diferencial Percentual

O relé diferencial percentual surgiu como um aperfeiçoamento do relé diferencial e é amplamente utilizado. Essencialmente, possui a mesma filosofia do relé diferencial apresentada anteriormente, mas esse relé tem uma robustez maior podendo restringir a operação da proteção quando ocorrer situações que geram correntes diferenciais, tais como: mudanças de tapes, saturação e erros dos TCs, erros da relação de transformação do transformador de potência, entre outras (OLIVEIRA, 2009).

Desta forma, o relé diferencial percentual faz uma comparação entre a corrente de restrição e a corrente de operação. O cálculo da corrente de restrição pode ser considerado de diferentes formas, tais como mostra as equações 1.1 e representa uma média entre as correntes do primário e secundário do TC. Já a corrente de operação é dada pela equação 1.4.

$$I_R = \frac{(i_{1S} + i_{2S})}{2} \quad (1.1)$$

$$I_R = k |I_{1S} + I_{2S}| \quad (1.2)$$

$$I_R = k (|I_{1S}| + |I_{2S}|) \quad (1.3)$$

$$I_{OP} = i_{1S} - i_{2S} \quad (1.4)$$

Onde i_{1S} e i_{2S} são as correntes instantâneas do secundário do TC primário e do TC secundário, respectivamente.

Devido a possíveis erros ocorridos no processo produtivo dos transformadores e as propriedades físicas dos materiais magnéticos utilizados,

podem surgir pequenas correntes diferenciais na bobina de operação do relé (OLIVEIRA, 2009). Com isso, utiliza-se uma constante k chamada de característica diferencial percentual, que serve como uma margem de corrente diferencial tolerável para a proteção.

$$k_{\%} = \frac{i_{1S} - i_{2S}}{(i_{1S} + i_{2S})/2} = \frac{I_{OP}}{I_R} \quad (1.5)$$

Desta maneira, a operação do relé diferencial percentual irá atuar quando a corrente diferencial (ID) satisfizer uma das relações dadas a seguir:

$$I_D \geq I_{OP} \quad (1.6)$$

$$I_D \geq k \frac{(i_{1S} + i_{2S})}{2} \quad (1.7)$$

$$I_D \geq k * I_R \quad (1.8)$$

O fator k indica a inclinação da curva de operação do relé, como mostra a Figura 3. A escolha do fator k dependerá de quão importante é o transformador a ser protegido, valores mais comumente usados são de 10% a 40%. Nota-se que quanto menor o valor de k mais sensível será o relé. O valor inicial CO representa a corrente mínima de operação, sendo que caso o algoritmo do relé detecte uma situação de tolerância, como uma sobre-excitação ou falta externa, a corrente mínima pode ser deslocada para até CO' alterando a curva de operação do relé e evitando que o mesmo atue desnecessariamente.

Uma prática utilizada é o emprego de duas curvas com inclinação distintas, sendo uma com inclinação mais sensível utilizada para baixas correntes de carregamento. A segunda inclinação é menos sensível para altas correntes provenientes de erros de TCs devido às altas correntes de carga e possíveis saturações em condições de faltas externas (GUZMÁN, 2001,2002).

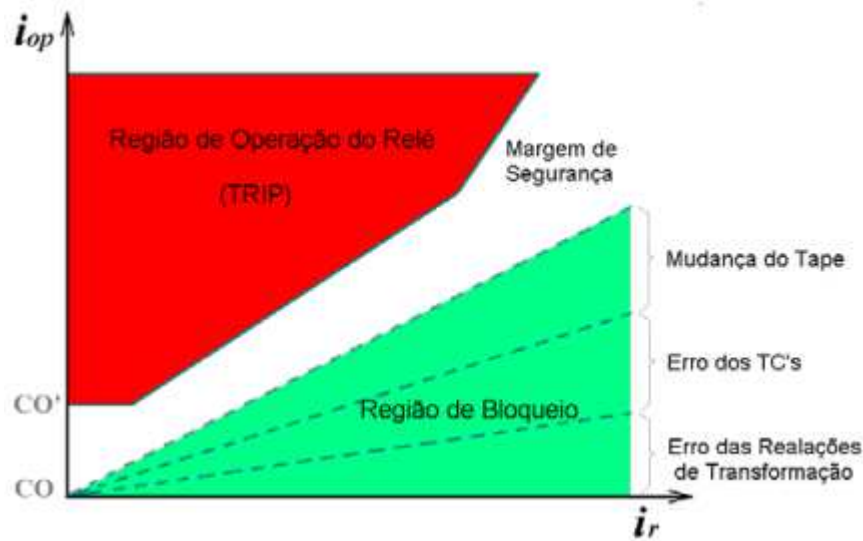


Figura 3: Características da curva de operação da proteção diferencial.
Fonte: retirado de OLIVEIRA, 2009.

2.4 Transitórios em transformadores

2.4.1 Corrente de Magnetização (“Corrente de Inrush”)

Durante a energização de transformadores ocorre um fenômeno conhecido como “corrente de inrush” que surge devido à magnetização e saturação do núcleo do equipamento. Como o transformador está a vazio durante a sua energização, ou seja, com o lado secundário desconectado do resto do sistema elétrico (sem carga), a corrente no lado secundário do transformador é nula, enquanto que no primário a corrente é elevada devido a energização. Como o sistema de proteção diferencial trabalha com a soma das correntes do primário e secundário provenientes dos TCs, a corrente diferencial torna-se elevada devido a não haver corrente no secundário, podendo acarretar na má-operação da proteção do equipamento. O efeito transitório do *inrush* pode durar alguns segundos até o sistema alcançar a condição de regime permanente e ainda atingir de 10 a 20 vezes a corrente nominal do transformador (EBNER, 2007). Tais correntes apresentam uma componente DC (corrente contínua) alta e com grandes níveis de harmônicas de 2ª ordem. Com isso, para evitar erros de operação da proteção devido a corrente de inrush, os relés devem ser ajustados

com uma sensibilidade menor, de modo a suportar tal transitório (BERNARDES, 2006).

A Figura 4 mostra a curva de histerese do núcleo de um transformador de potência. Quando uma corrente é aplicada no núcleo do transformador o fluxo aumenta percorrendo do ponto 0 até 1, e quando esse campo magnético é removido, o fluxo magnético no núcleo (Φ_n) percorre do ponto 1 ao 2, sendo Φ_R o fluxo magnético residual. Todo material ferromagnético quando submetido à magnetização não retorna ao seu estado original quando não está mais sujeito ao campo magnético externo (OLIVEIRA, 2009).

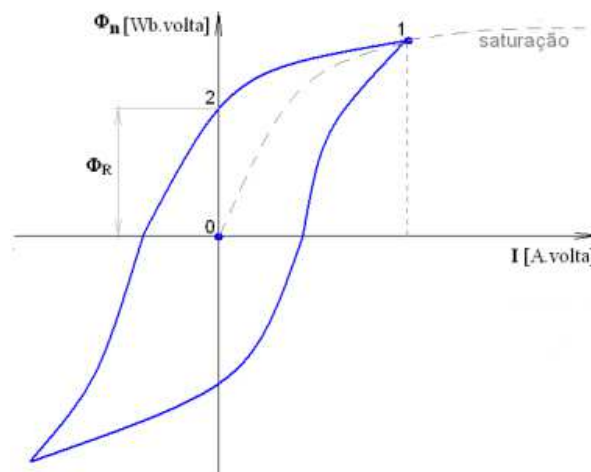


Figura 4: Curva de histerese do núcleo de um transformador de potência.

Fonte: retirado de OLIVEIRA, 2009.

Para compreender esse fenômeno (OLIVEIRA, 1984), considere que uma tensão senoidal é aplicada ao enrolamento primário do transformador, sendo que o secundário está a vazio, assim:

$$v_1 = r_1 \cdot i_o + l_1 \frac{di_o}{dt} + N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1.9)$$

Sendo:

$r_1 \cdot i_o$ – queda de tensão na resistência do primário;

$l_1 \frac{di_o}{dt}$ - queda de tensão devido ao fluxo de dispersão no enrolamento primário;

$N_1 \frac{d\phi}{dt}$ - força eletromotriz induzida no primário.

A equação diferencial apresentada mostra a relação existente entre o fluxo Φ e a corrente a vazio i_0 , representando a relação não-linear do ciclo de histerese.

Em virtude dessa não-linearidade, faz-se necessário uma aproximação para obter-se i_0 a partir da equação 1.9. Com isso, a solução consistirá em duas partes fundamentais: 1) solução complementar; e 2) solução particular. A primeira solução irá representar o período transitório e a segunda, o de regime permanente.

Com relação ao período transitório, um fenômeno constatado por Fleming em 1892, mostrou que quando um transformador é conectado a rede há, por vezes, o surgimento de uma grande corrente transitória de magnetização (corrente de inrush). O efeito de tal corrente causa uma queda de tensão momentânea podendo causar a operação de relés instantâneos (OLIVEIRA, 1984).

Segundo Fleming o valor da corrente transitória dependerá de dois fatores:

- Ponto do ciclo da tensão no qual a chave para a energização é fechada;
- Condições magnéticas do núcleo, incluindo a intensidade e polaridade do fluxo residual.

Em relação a equação 1.9, considerando como uma primeira aproximação, os dois primeiros termos são desprezados, e admitindo que no instante inicial da energização, a tensão da fonte passa por um valor $V_{1m} \cdot \text{sen}\alpha$, em que α é um ângulo qualquer cujo propósito é definir o valor da tensão da fonte em um instante $t = 0$. Tem-se que:

$$v_1 = V_{1m} * \text{sen}(\omega t + \alpha) = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1.10)$$

Sendo:

V_{1m} – tensão no instante de energização ($t = 0$)

α – ângulo que define o valor da tensão.

Integrando-se a equação 1.10, temos:

$$\phi = \phi_0 + \phi_m * \cos \alpha - \phi_m * \cos(\omega t + \alpha) \quad (1.11)$$

Em que:

Φ_0 – fluxo residual no instante $t = 0$;

$\Phi_m = V_{1m}/N_1\omega$.

Em casos reais o termo $(\Phi_0 + \Phi_m * \cos \alpha)$ apresenta amortecimento, e com isso, após o transitório terminar o fluxo no núcleo será dado apenas por $\Phi_m * \cos(\omega t + \alpha)$.

O valor de pico do fluxo (Φ_{pico}) é alto e como o fluxo é produzido por i_0 , tem-se que é necessário uma grande corrente nos primeiros instantes da energização. A Figura 5 mostra um exemplo de comparação entre os níveis de corrente de inrush (I_r) com a corrente nominal (I_n) de regime permanente.

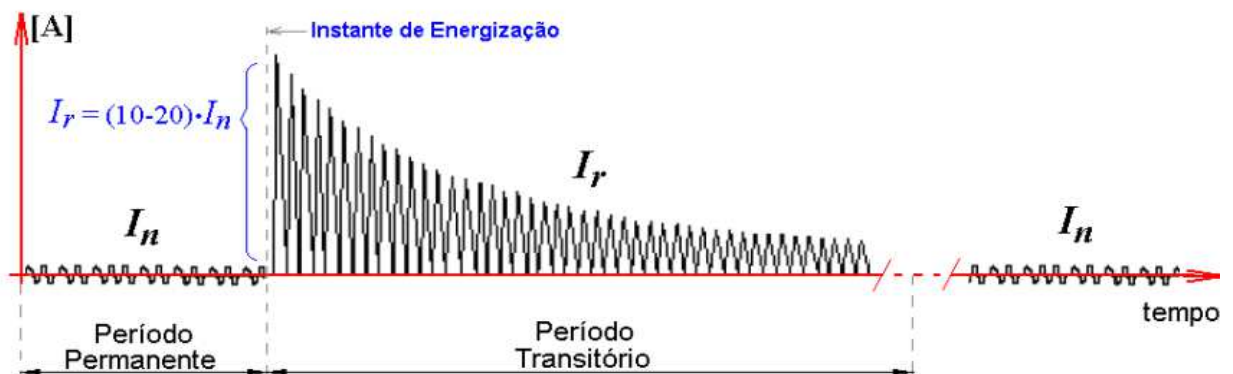


Figura 5: Comparação entre corrente de inrush e corrente nominal.
Fonte: retirado de OLIVEIRA (2009).

Com base no que foi dito anteriormente, o sistema de proteção diferencial deve ter a capacidade de distinção para as situações de correntes de energização e faltas internas. Para isso, alguns métodos são utilizados para evitar desligamentos indevidos do equipamento, tais como: temporização do relé diferencial (time delay),

diminuição da sensibilidade do relé diferencial durante a energização e restrição de harmônicos (ANDERSON, 1999).

Dentre os métodos mencionados, aquele baseado na restrição de harmônicos é o mais amplamente usado. Analisando os sinais do transitório ocorrido durante a energização do transformador, nota-se a presença elevada de componentes de 2ª harmônica, já em situações de faltas surgem principalmente componentes de frequência fundamental (DE MELLO, 1979). Este método será explicado com mais detalhes posteriormente.

2.4.2 Sobre-excitação do transformador

Quando os transformadores são submetidos a condições de sobre-excitação as correntes apresentam um comportamento não-linear, provocado pela saturação magnética do núcleo (HARLOW, 2007). O fluxo de magnetização no núcleo do transformador é diretamente proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional à frequência do sistema, como mostra a equação 1.12.

$$V_{ef} = 4,44 * n * \phi * f \quad (1.12)$$

A condição de saturação magnética do núcleo ocorre quando o transformador é submetido a valores de tensão muito superiores a tensão nominal e/ou a subfrequências. Diante disso, devido ao comportamento não-linear das correntes, há o surgimento de distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem, principalmente, gerando um aumento na corrente de magnetização e conseqüentemente na corrente diferencial (BERNARDES, 2006)(BLACKBURN, 2007). Com isso, deve-se buscar soluções para evitar a atuação indevida do sistema de proteção quando diante desse transitório.

2.4.3 Saturação dos transformadores de corrente (TC)

Os transformadores de corrente são equipamentos com um papel extremamente importante no sistema de proteção diferencial, pois são responsáveis pela redução da magnitude das correntes do sistema para níveis que possam ser medidos com segurança, além de fornecer um isolamento galvânico entre a rede de energia e o relé de proteção. Com isso, estão sujeitos a altos níveis de correntes que podem levar a saturação do seu núcleo devido ao aumento do fluxo de magnetização. O núcleo de ferro dos transformadores tem uma capacidade de transmissão de fluxo magnético limitado proveniente das propriedades físicas dos materiais utilizados (KENNEDY, 1998).

Situações como faltas externas próximas aos TCs, podem fazer com que surjam correntes elevadas de até 50 vezes a corrente nominal (HOROWITZ e PHADKE, 1995). Tal corrente pode saturar o núcleo do TC e produzir uma distorção nas correntes secundárias dos equipamentos (ANDERSON, 1999), como mostra a Figura 6. Com essa distorção a representação da corrente primária fica comprometida e pode levar a uma corrente diferencial elevada fazendo com que o sistema de proteção atue indevidamente. Com isso, condições de saturação de TC devem ser consideradas para se ter um sistema de proteção eficiente e confiável evitando operações indevidas.

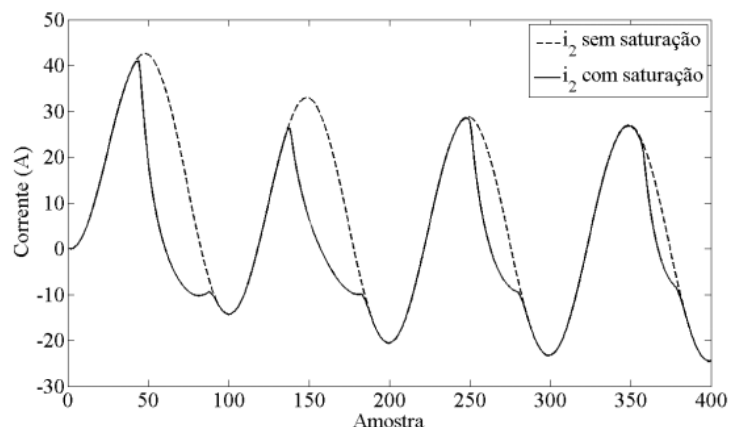


Figura 6: Forma de onda de corrente secundária de um TC saturado e não-saturado.
Fonte: retirado de SANTOS, 2011.

2.4.4 Remoção de faltas próximas ao transformador

Na ocorrência de remoção de falta externa próximas ao transformador, surge uma situação semelhante a encontrada durante a energização do transformador (HOROWITZ e PHADKE, 1995). Nessa situação a tensão aplicada sob os enrolamentos do equipamento passa de um valor de falta para um de pós-falta, fazendo com que o fluxo concatenado comporte-se da mesma maneira. Com isso, dependendo do instante de remoção da falta há um deslocamento da componente DC no fluxo concatenado (BRANCO, 2009). Tal situação faz com que as formas de onda da corrente primária sejam similares às de condições de inrush ocorridas durante a energização do transformador. Uma questão a ser considerada é que não existe fluxo remanescente no núcleo durante tal condição, e com isso, a corrente gerada é menor que durante a energização do transformador.

2.4.5 Rejeição de carga

Durante rejeições de carga o transformador pode estar sujeito a sobretensões em regime permanente, pois esse fenômeno está diretamente relacionado com a frequência e tensão do sistema (HOROWITZ e PHADKE, 1995). Quando um sistema está estável e em condições normais de operação, a potência mecânica de entrada do eixo do gerador é igual a soma das cargas conectadas a ele, e ainda somada as perdas de potência reais do sistema. Caso ocorra uma interferência no balanço da potência de entrada e de saída, pode levar a uma mudança na frequência das grandezas elétricas geradas pela máquina (BRETAS, 2000), tendo como consequência uma enorme massa rotacional do rotor (turbina e gerador) atuando como um depósito de energia cinética. Deste modo, quando há um aumento de carga o rotor diminui a velocidade, suprimindo energia para o sistema. Opostamente, quando há uma redução considerável da carga o gerador acelera absorvendo energia.

Com base no mencionado acima, pode-se fazer uma analogia com a operação do transformador. Os transformadores são projetados para operar perto do “joelho” da curva de saturação do seu núcleo magnético. Com isso, qualquer

sobretensão ou sub-frequência irá causar um aumento anormal no fluxo magnético do núcleo, resultando em um aumento da temperatura do mesmo (ANDERSON, 1999). De uma maneira geral, o fluxo pode ser definido em função da tensão, frequência e de uma constante de proporcionalidade, que são definidas a partir dos parâmetros do sistema (BERNARDES, 2006).

$$\phi = k \left(\frac{V}{f} \right) \quad (1.13)$$

Deste modo, o transformador quando submetido a condições de rejeição de carga pode ser submetido a formas de onda distorcidas devido a características não-lineares, compostas por harmônicos ímpares, particularmente de 3° e 5° ordem, fazendo surgir correntes diferenciais significativas que podem sensibilizar a proteção diferencial indesejavelmente.

2.4.6 Energização solidária (*Sympathetic Inrush*)

A ligação de transformadores em paralelo é uma importante operação feita no SEP, oferecendo uma maior confiabilidade no fornecimento de energia, assim como uma maior potência (OLIVEIRA, 1984). No entanto, a energização desses equipamentos em paralelo com os demais dispositivos, gera transitórios e sobretensões nos transformadores próximos, mesmo estes estando em operação normal.

A Figura 7 mostra a situação de energização de um transformador em paralelo com outro. O transformador TR1 já está previamente energizado e o transformador TR2 ainda não foi energizado. Quando a chave CH2 é fechada inicia a energização do transformador TR2, fazendo com que surja uma corrente de magnetização (*inrush*) nos enrolamentos do primário de TR2. A corrente de *inrush* possui uma componente DC que é atenuada ao longo do tempo, produzindo uma queda de tensão na linha de transmissão. Essa queda de tensão produzida pela componente DC forçará o transformador já energizado (TR1) a produzir fluxo de magnetização

com sentido oposto ao fluxo do transformador que está sendo energizado, fazendo com que surja correntes de magnetização no transformador TR1 (ALENCAR, 2013).

Mesmo com a corrente produzida pela energização solidária sendo menor que a corrente de *inrush*, poderá afetar o sistema de proteção diferencial fazendo com que o mesmo opere de maneira indevida. Sendo assim, a energização solidária de transformadores deve ser analisada para obter-se um sistema de proteção mais confiável.

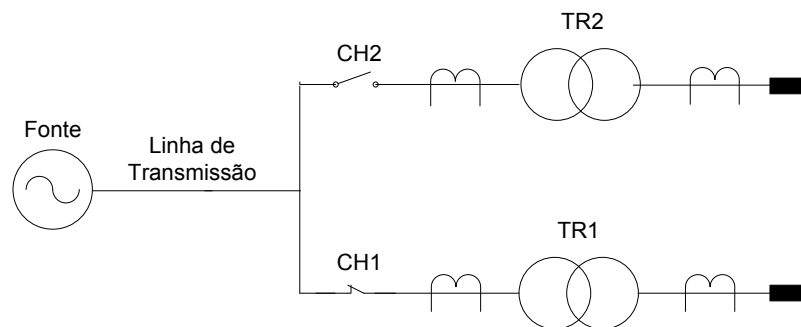


Figura 7: Energização Solidária (Sympathetic Inrush).

2.5 Considerações finais

A proteção diferencial é a metodologia mais amplamente utilizada para proteger os transformadores de potência, devido a sua simplicidade e sensibilidade de operação. No entanto, o sistema de proteção está sujeito a transitórios que não são corretamente identificados, podendo implicar em atuação indevida da proteção. Dentre os transitórios apresentados no capítulo, as correntes de *inrush* são mais difíceis de discriminar, sendo muitas vezes confundida com as faltas internas devido ao alto pico na magnitude da corrente. Outros surtos, como os apresentados, também podem afetar o sistema de proteção, exigindo assim um alto grau de eficiência e robustez por parte da metodologia de proteção.

3 CONCEITOS SOBRE TRANSFORMADA WAVELET

3.1 Considerações gerais

A Transformada Wavelet tem sido amplamente aplicada em Sistemas Elétricos de Potência, principalmente em tópicos como proteção e qualidade de energia. Sendo assim, a aplicação da Transformada Wavelet mostra-se como uma alternativa para resolver alguns problemas encontrados na proteção diferencial de transformadores, favorecendo o processamento e análise dos sinais envolvidos nos transitórios eletromagnéticos.

Com o desenvolvimento da ferramenta, diversas famílias de wavelets foram surgindo, cada qual com suas características específicas, aumentando assim a sua gama de aplicação.

3.2 Transformada Wavelet

Quando um sinal é descrito no domínio do tempo nem sempre é possível extrair informações completas, já que algumas informações somente podem ser melhor analisadas no domínio da frequência. Com isso torna-se necessária de uma representação tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência (MARTINEZ, 2003)(MOA, 2001).

A Transformada de Fourier (TF) é uma ferramenta matemática muito utilizada para passar um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. A TF é utilizada durante o processo de análise e processamento de sinais com características periódicas, porém, não é adequada para sinais não-periódicos. A resolução temporal do sinal da TF é muito pequena, não sendo preciso o suficiente para identificar onde certas frequências aparecem no sinal. Desta forma, a TF determina “quais” frequências que pertencem a uma determinada função, mas não “onde” essas frequências ocorrem (OLIVEIRA, 2009)(EISSA, 2005).

Com isso, a Transformada Wavelet (TW) surgiu como solução capaz de representar uma função tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, sendo possível determinar em qual intervalo de tempo determinadas

componentes espectrais ocorrem, tornando-se assim, uma ferramenta poderosa no processamento de sinais.

As TW mais utilizadas na aplicação de análise de sinais são divididas em: Transformada Wavelet Contínua (TWC) e Transformada Wavelet Discreta (TWD). A diferença entre os tipos de wavelets é descrita pela forma em que os parâmetros são discretizados (OLIVEIRA, 2009)(GUIDO, 2009).

Para a definição matemática da Transformada Wavelet, considera-se um sinal contínuo $f(t)$. A transformada wavelet contínua de $f(t)$ é dada por:

$$F(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi_{a,b}(t)dt \quad (1.14)$$

Sendo que os parâmetros a e b variam continuamente, e a função Ψ denominada como wavelet mãe é definida como:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1.15)$$

A constante $1/\sqrt{a}$ é utilizada para normalizar e garantir que a energia de $\Psi_{a,b}(t)$ seja independente do nível de dilatação da janela (OLIVEIRA, 2009). As wavelet derivam a partir de operações de dilatação e translação da wavelet mãe. Essa wavelet mãe deve satisfazer o critério de admissibilidade (DAUBECHIES, 1990), dada pela equação 1.14.

$$C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(y)|^2}{|y|} dy < \infty \quad (1.16)$$

Sendo $\hat{\Psi}(y)$ é a TF de $\Psi(y)$. Isto significa dizer que se $\hat{\Psi}$ é uma função contínua, então C_{Ψ} pode ser finito somente se $\hat{\Psi}(0) = 0$, ou seja (DAUBECHIES, 1990):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (1.17)$$

Analisando a equação 1.12, nota-se que a TW depende de dois parâmetros, a e b , que representam as informações de escala e tempo, ou dilatação e translação, respectivamente. Com isso, o sinal de uma dimensão $f(t)$ é desdobrado em uma transformada bidimensional $F(a,b)$, permitindo uma análise tempo-frequência do sinal (FILHO, 2003).

3.2.1 Transformada Wavelet Contínua

A TWC de um sinal $f(t)$ em relação a uma wavelet mãe Ψ é definida como:

$$TWC(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1.18)$$

Onde a é o fator de escala e b o fator de translação, sendo ambas variáveis contínuas. A equação 1.16 mostra que o sinal unidimensional original $f(t)$ é mapeado em uma nova função, em um espaço bidimensional, em escala a e translação b , através da TW.

3.2.1.1 Escala

Modificar a escala de uma wavelet mãe significa dilatar ou comprimir a mesma. Na Figura 8 é mostrado um exemplo de mudança do fator de escala a de uma função senóide. É possível notar que, quanto menor for a , mais comprimida é a wavelet.

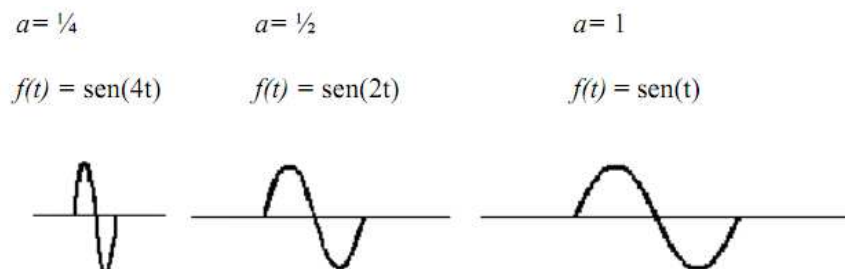


Figura 8: Exemplo de variação do fator de escala a .
Fonte: retirada de FILHO, 2003.

Uma escala pequena para a faz com que as wavelets sejam mais comprimidas e os detalhes mudem rapidamente, permitindo uma análise das altas frequências do sinal. Já para escalas grandes, a wavelet é mais dilatada e os detalhes não mudam tão rápido, permitindo uma análise das baixas frequências do sinal (OLIVEIRA, 2009).

3.2.1.2 Translação

Transladar uma wavelet significa deslocá-la no eixo do tempo, o que pode ser descrito matematicamente por $f(t - k)$, com um atraso na função de k .

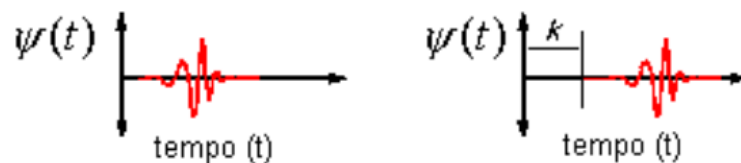


Figura 9: Exemplo de translação de uma função wavelet.

Fonte: retirada de FILHO, 2003.

3.2.2 Transformada Wavelet Discreta

A TWC apresenta uma maior necessidade de esforço computacional para calcular as escalas e translações do sinal. Com isso, a sua utilização para análise e detecção de transitórios eletromagnéticos torna-se restrita. Para solucionar tal problema, é realizada uma discretização dos fatores de escala e translação, o que dá origem à Transformada Wavelet Discreta (TWD). A TWD de uma sinal contínuo $f(t)$ é dada por:

$$TWD(m, p) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{m,p} dt \quad (1.19)$$

A equação 1.17 é a forma base das funções wavelets, criadas a partir da wavelet mãe $\Psi_{a,b}$ transladada e dilatada utilizando os parâmetros de translação e dilatação m e p , respectivamente (DINIZ, 2007).

Sendo que, $\Psi_{m,p}$ é dada por:

$$\Psi_{m,p} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Psi \left(\frac{t - pb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (1.20)$$

Aplicando a TWD em um sinal discreto $x[n]$, a Equação 1.17 é expressa por:

$$TWD(m,k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x[n] \cdot g \left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (1.21)$$

Sendo a wavelet mãe dada por:

$$g \left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (1.22)$$

Os parâmetros de escala a e translação b são função de um parâmetro inteiro m e n , isto é $a = a_0 m$ e $b = nb_0 a_0 m$, sendo a_0 e b_0 as constantes usadas para gerar a família das funções wavelets (FILHO, 2003).

3.2.3 Transformada Wavelet Discreta através de banco de filtros

Em diversas aplicações, a TW é feita através da implementação por banco de filtros, sendo que a TWD é um processo de filtragem digital no domínio do tempo, via convolução discreta, tendo um operador de redução (downsampling) por 2 (JEMSE e HARB, 2000).

A Figura 10 mostra a decomposição de um sinal em vários níveis. Conforme a figura, o sinal é filtrado utilizando um filtro passa-baixa (L) e um filtro passa-alta (H), e aplicado o operador de downsampling na saída de cada filtro (BRANCO, 2009). O sinal proveniente do filtro passa-baixa representa a aproximação do sinal, e nele

estão contidos os sinais de baixa frequência. Já o sinal proveniente do filtro passa-alta representa o detalhe do sinal em análise, e nele estão contidos os sinais de alta frequência. Este processo de filtragem quando aplicado sucessivamente nas aproximações faz com que o sinal seja dividido ao meio em cada nível de decomposição após a passagem pelos filtros, como mostra a Figura 11. O sinal resultante da decomposição é representado pela concatenação da aproximação com os detalhes (BRANCO, 2009).

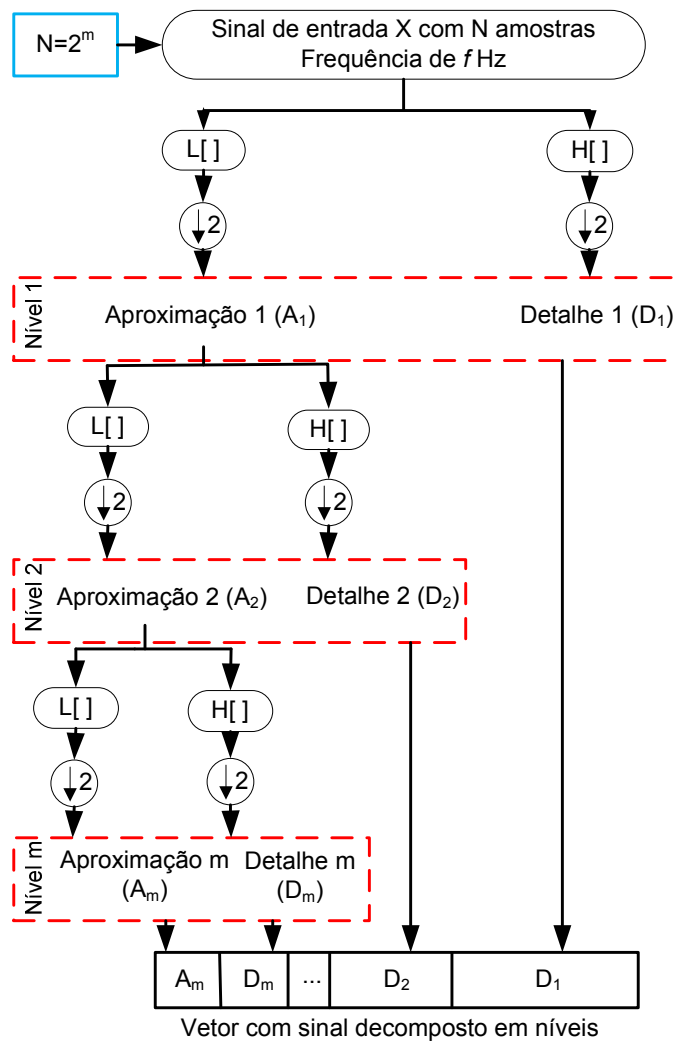


Figura 10: Decomposição de um sinal utilizando TWD.

Fonte: Adaptado de BRANCO, 2009.

A decomposição do sinal através da TWD depende do tipo de filtros utilizando. Com isso, a escolha da wavelet mãe a ser empregada é de extrema importância, pois cada família de wavelet tem suas peculiaridades.

Sinal	Faixas de Frequência (Hz)	Nº de Amostras
x	0 ~ f	N
A ₁	0 ~ f/2	N/2
D ₁	f/2 ~ f	N/2
A ₂	0 ~ f/4	N/4
D ₂	f/4 ~ f/2	N/4
A _m	0 ~ f/2 ^m	1
D _m	f/2 ^m ~ f/2 ^{m-1}	1

Figura 11: Exemplo de faixas de frequência e número de amostras por nível de decomposição.
Fonte: retirado de BRANCO, 2009.

3.2.3 Famílias de Wavelets

A escolha da wavelet é de grande importância para a análise do sinal, e com isso se tem diversas alternativas para a escolha de famílias. A seguir serão apresentados alguns tipos de famílias de wavelet e suas características.

3.2.3.1 Wavelet de Haar

A wavelet de Haar é a mais simples entre os tipos de wavelets. Na forma discreta, a Wavelet de Haar está relacionada com uma operação matemática chamada de Transformada de Haar. A Transformada de Haar serve como um protótipo para todas as outras transformadas wavelets (WALKER, 1999).

Uma propriedade da Transformada de Haar é que tem suporte compacto, porém ela não é diferenciável, fazendo com que limite sua aplicação (FILHO, 2003). Na Figura 12 é apresentada a Wavelet de Haar.

$$\psi(t) = \begin{cases} +1 & 0 \leq t < 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t < 1 \end{cases}$$

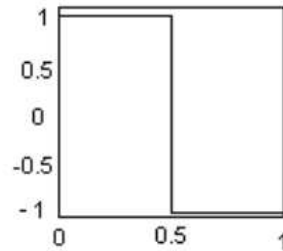


Figura 12: Transformada Wavelet de Haar.
Fonte: retirado de FILHO, 2003.

3.2.3.2 Wavelet Biortogonais

Este tipo de wavelet exibe uma propriedade de fase linear, na qual é necessária para a reconstrução do sinal. A família biortogonal utiliza duas wavelets, uma para a decomposição e outra para a reconstrução, tem suporte compacto e é simétrica. As wavelets biortogonais são definidas como pares de bases mutuamente ortogonais, mas nenhum desses pares é ortogonal.

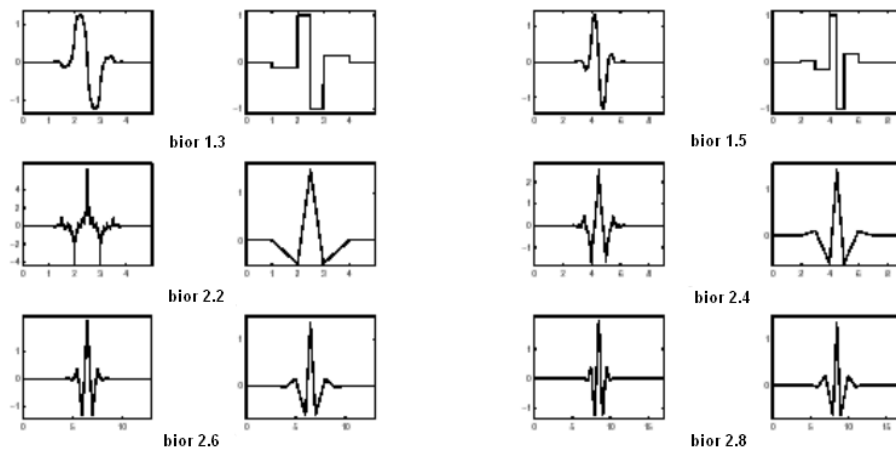


Figura 13: Wavelet do tipo Biortogonal.

3.2.3.3 Wavelet de Daubechies

As wavelets ortogonais de Daubechies, “dbN”, são perfeitamente compactas no tempo, mas no domínio da frequência, tem um alto grau de superposição espectral entre as escalas. Sua grande vantagem é ser ortogonal, o que significa que um erro no sinal de entrada não cresce com a transformação e a estabilidade numérica computacional é assegurada. Por outro lado não possuem fase linear. Na Figura 14 são apresentados exemplos de wavelets de Daubechies em diferentes níveis de decomposição do sinal.

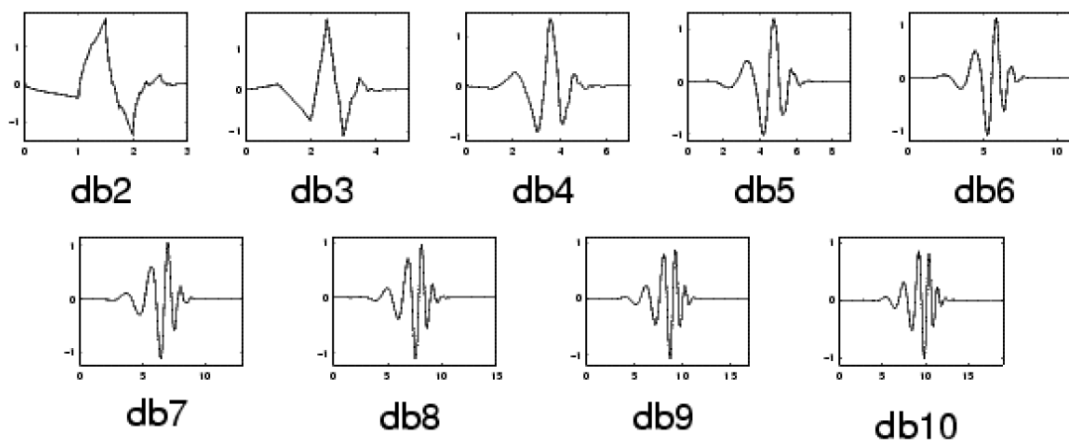


Figura 14: Wavelets de Daubechies.

3.2.3.4 Wavelets tipo Symlets

Este tipo de wavelet foi proposta por Daubechies como uma modificação à família “dbN”. Como possuem propriedades similares, tendem a ser simétricas.

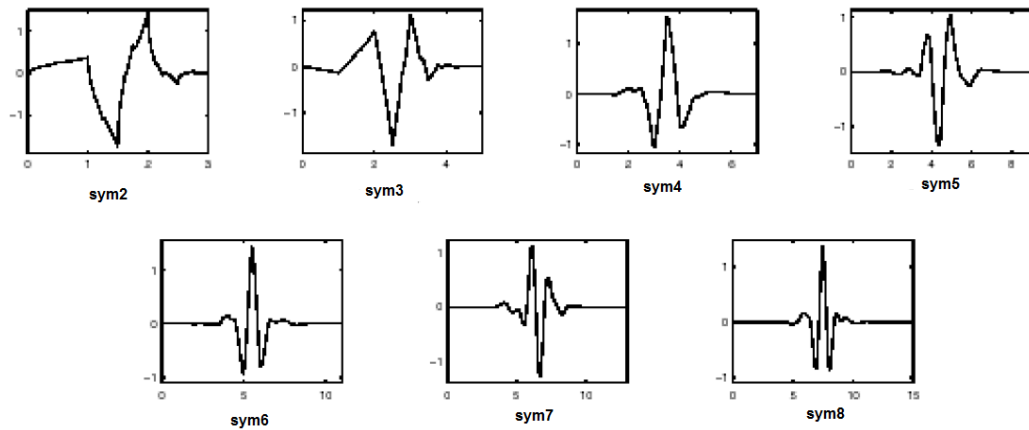


Figura 15: Wavelets tipo Symlets.

3.2.3.5 Wavelets tipo Coiflets

Esta família de wavelets é mais simétrica do que o tipo Symlets. Foi criada por Daubechies após pedido de Ronald Coifman.

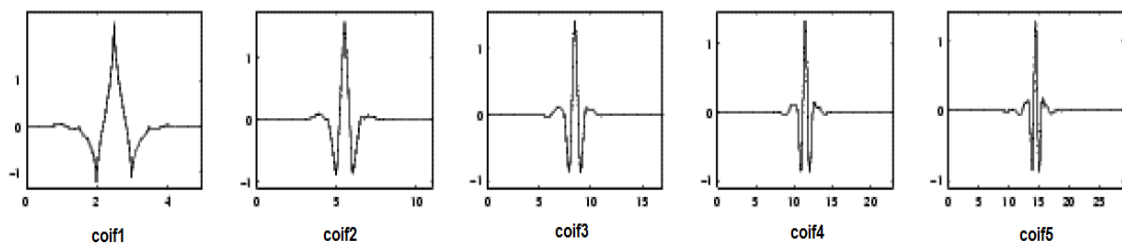


Figura 16: Wavelets tipo Coiflets.

Cabe salientar que as wavelets apresentadas acima são apenas algumas das diversas famílias existentes. O software Matlab tem uma ferramenta toolbox que possibilita a análise de sinais com diversos tipos de wavelets. Digitando no workspace do Matlab o comando “wavemenu” é possível acessar a ferramenta toolbox.

3.3 Considerações Finais

Os sistemas elétricos estão sujeitos a transitórios eletromagnéticos que necessitam de uma análise complexa para identificá-los, sendo necessário muitas vezes trabalhar no domínio do tempo e da frequência. Com isso a Transformada Wavelet mostra-se uma ferramenta poderosa para a análise de sinais, permitindo-se trabalhar em ambos os domínios, tempo e frequência.

Outro ponto importante são as diversas famílias de wavelets mãe, o que possibilita escolher a que melhor se adapta na análise do sinal estudado.

4 ALGORITMO PROPOSTO

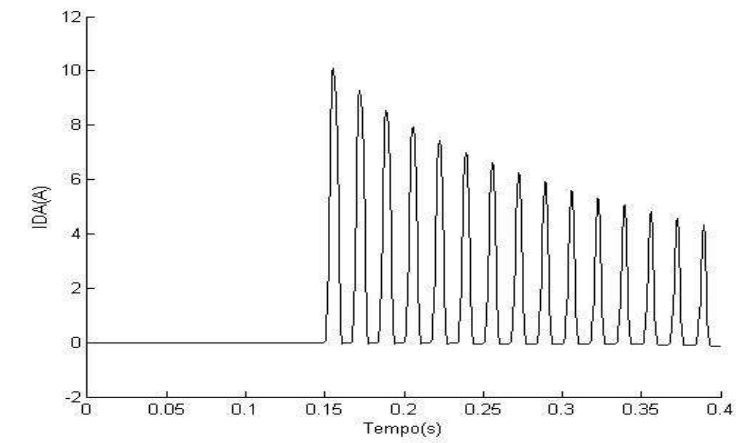
4.1 Considerações gerais

Este capítulo descreve o algoritmo proposto para melhorar o sistema de proteção de transformadores de potência, principalmente quanto a identificação e discriminação das situações de correntes de *inrush* e faltas internas. Inicialmente uma justificativa do uso da técnica é apresentada, seguido do passo a passo do caminho dos dados das correntes diferenciais para um melhor entendimento do funcionamento do algoritmo. O fluxograma do algoritmo é mostrado para favorecer o seu entendimento.

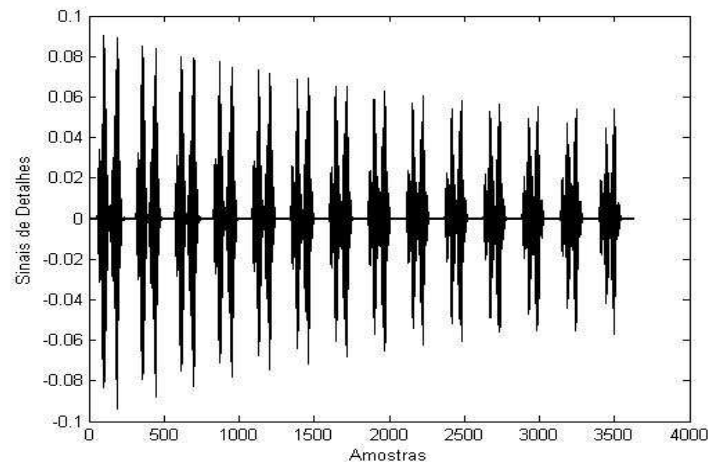
4.2 Desenvolvimento do Algoritmo

O algoritmo proposto neste trabalho tem como objetivo detectar e classificar os transitórios ocorridos em transformadores de potência, de modo a aumentar a confiabilidade do seu sistema de proteção. O algoritmo proposto funciona em tempo real, integrado como uma sub-rotina ao relé diferencial utilizando a TWD nas correntes diferenciais para identificação e classificação dos transitórios.

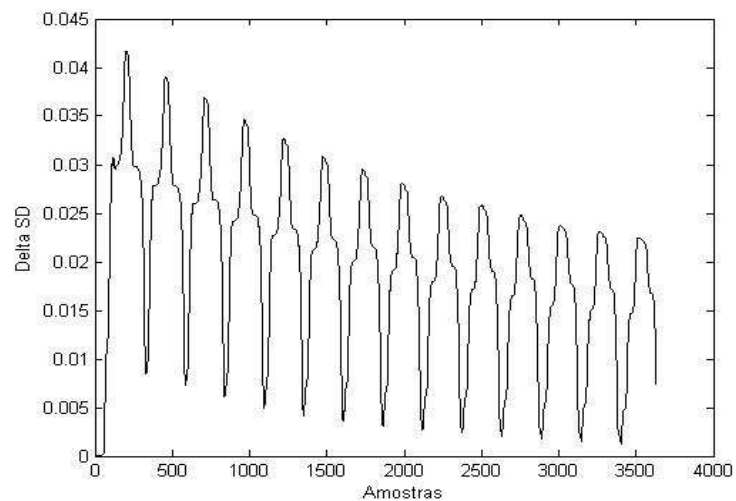
A detecção de transitórios é baseada na análise e monitoramento das últimas amostras dos coeficientes de detalhes, chamada de Sinais de Detalhes (SD) do primeiro nível de decomposição da TWD do tipo Daubechies 'db4'. A utilização dos coeficientes de detalhes é devido a apresentarem uma variação próxima de zero dos detalhes durante o *inrush* e uma variação brusca para faltas internas. Na Figura 17 é mostrada a corrente diferencial de uma fase (A) para uma situação de *inrush* (a), assim como os Sinais de Detalhes (b) e a Variação dos Sinais de Detalhes (ΔSD)(c).



(a)



(b)

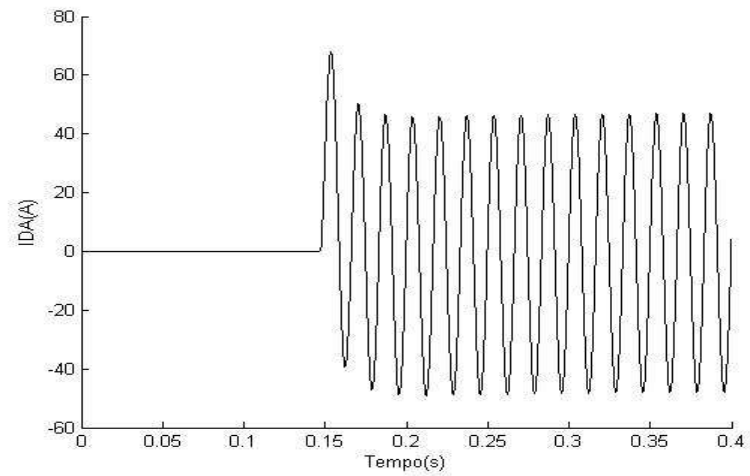


(c)

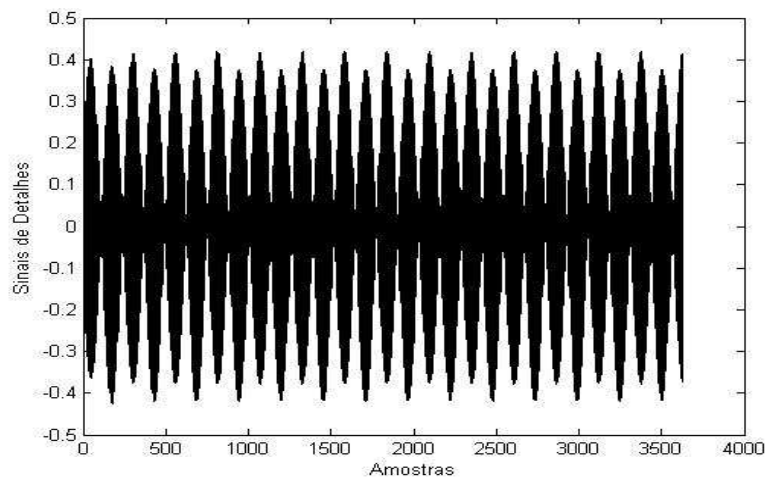
Figura 17: (a) Corrente diferencial da fase A com inrush; (b) Sinais de Detalhes da fase A; (c) Variação dos Sinais de Detalhes da fase A.

Já na Figura 18 é apresentada a corrente diferencial de uma fase (A) para uma situação de energização com falta interna no primário em 10% dos enrolamentos da

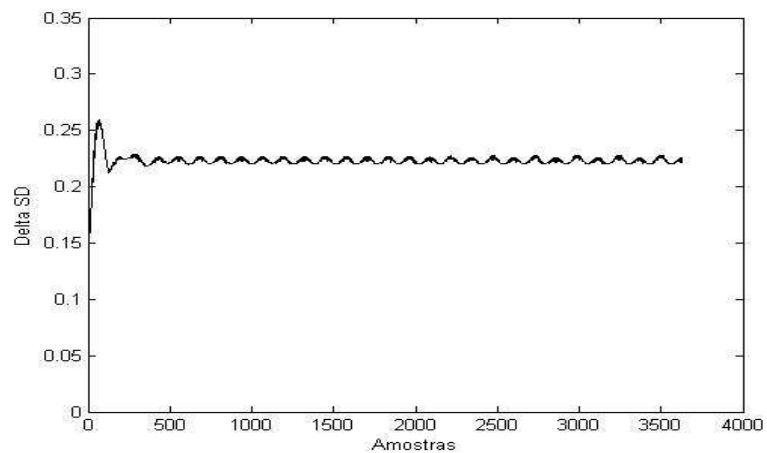
fase A (a), assim como os Sinais de Detalhes (b), e a Variação dos Sinais de Detalhes (c) para tal situação.



(a)



(b)



(c)

Figura 18: (a) Corrente diferencial da fase A em situação de energização com falta interna no primário em 10% dos enrolamentos da fase A; (b) Sinais de Detalhes da fase A; (c) Variação dos Sinais de Detalhes da fase A.

A Figura 17 (c) permite observar que a variação dos sinais de detalhes para a situação de *inrush* é próxima de zero. Já para a situação de energização com falta interna, Figura 18 (c), os sinais de detalhes apresentam uma variação brusca no momento da falta. Com isso, é possível identificar e discriminar tais situações tornando o sistema de proteção de transformadores de potência mais seguro e eficiente.

A Figura 19 mostra o fluxograma do algoritmo proposto, sendo este dividido em blocos para um melhor entendimento.

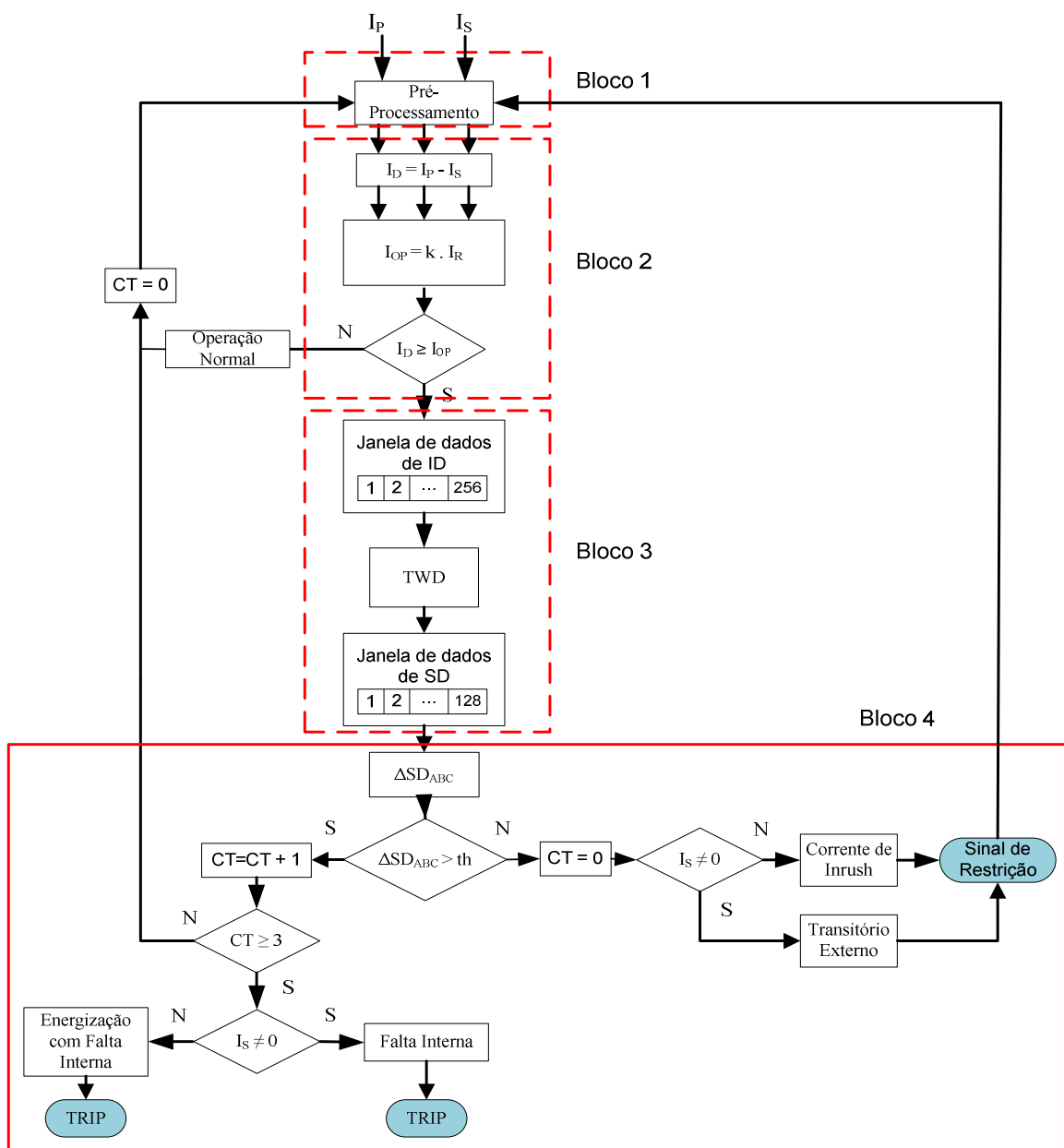


Figura 19: Fluxograma do algoritmo proposto

Primeiramente, os sinais das correntes do primário e secundário são transformadas para níveis mais seguros de corrente com o auxílio de TCs, iniciando assim o sistema de proteção, como segue.

Bloco 1: Pré-Processamento dos dados

No bloco 1 os dados são pré-processados para evitar erros na análise dos sinais das correntes. No sistema simulado, os dados foram coletados a uma frequência de 20kHz, em um intervalo de tempo de 0,4 segundos.

Primeiramente, os dados de correntes são filtrados utilizando um filtro passa-baixa do tipo Butterworth de 2ª ordem, com uma frequência de corte de 480Hz. Após, os dados são reamostrados para uma frequência de 15,36kHz, fazendo com que se tenham 256 amostras/ciclo.

Com os dados filtrados e reamostrados, faz-se a correção da defasagem angular das correntes do lado delta do transformador, e a eliminação da componente de sequência zero do lado em Y do transformador.

Os equacionamentos utilizados no Bloco 1 são descritos no Capítulo 2.

Bloco 2: Detecção de transitório

Após a etapa de pré-processamento, inicia-se a análise dos sinais com o cálculo das correntes diferenciais dada pela equação 1.33:

$$\begin{aligned} Id_A &= (i_{1As} - i_{2As}) \\ Id_B &= (i_{1Bs} - i_{2Bs}) \\ Id_C &= (i_{1Cs} - i_{2Cs}) \end{aligned} \quad (1.23)$$

Sendo que:

i_{1As} , i_{2As} : correntes do primário e secundário provenientes do secundário dos TC's do transformador de potência na fase A, respectivamente.

i_{1Bs} , i_{2Bs} : correntes do primário e secundário provenientes do secundário dos TC's do transformador de potência na fase B, respectivamente.

i_{1Cs} , i_{2Cs} : correntes do primário e secundário provenientes do secundário dos TC's do transformador de potência na fase C, respectivamente.

Juntamente com a corrente diferencial o algoritmo calcula a corrente de operação das fases, dada pela equação 1.34:

$$\begin{aligned} I_{op}^A &= k * I_{RA} = k * \frac{(i_{1As} + i_{2As})}{2} \\ I_{op}^B &= k * I_{RB} = k * \frac{(i_{1Bs} + i_{2Bs})}{2} \\ I_{op}^C &= k * I_{RC} = k * \frac{(i_{1Cs} + i_{2Cs})}{2} \end{aligned} \quad (1.24)$$

Sendo que:

k : constante chamada de *característica diferencial percentual*, adotada como $k=0,3$.

I_{RA} , I_{RB} e I_{RC} : correntes de restrição das fases A, B e C, respectivamente.

O algoritmo é ativado quando qualquer uma das correntes diferenciais ultrapassa o valor da corrente de operação das fases, passando assim para o Bloco 3.

Bloco 3: Decomposição através da TWD

Quando os sinais das correntes passam para esta etapa do algoritmo, os dados são armazenados em vetores contendo 256 amostras (para cada fase) para serem decompostos pela a TWD da família Daubechies ("db4"). Com a decomposição dos dados, gera-se um vetor contendo 128 coeficientes de detalhes no primeiro nível de decomposição da TWD.

Como a janela de dados é móvel e seus valores mudam a cada instante de tempo, os coeficientes de detalhes provenientes da TWD necessitam ser recalculados. Com isso, cada janela de dados de 256 amostras resultará em 128 coeficientes de detalhes e 128 coeficientes de aproximação no primeiro nível de decomposição. Caso fosse, por exemplo, cinco janelas de dados de correntes a serem decompostas pela TWD, seriam obtidos 640 coeficientes de detalhes. No âmbito das simulações realizadas neste trabalho poderia ter 6144 coeficientes de detalhes para serem armazenados em um instante de tempo de 0,4 segundos, tornando inviável e desnecessário armazenar tantos dados para instantes de tempos

maiores. Portanto, para a análise dos dados considerou-se somente a última amostra da janela de dados dos coeficientes de detalhes provenientes da decomposição da TWD, ou seja, a posição 128. Esse último dado da posição 128 é chamado de *Sinal de Detalhe* (SD) e é atribuído a um vetor com tamanho de 128 amostras. A Figura 20 apresenta o funcionamento da atribuição dos dados para análise.

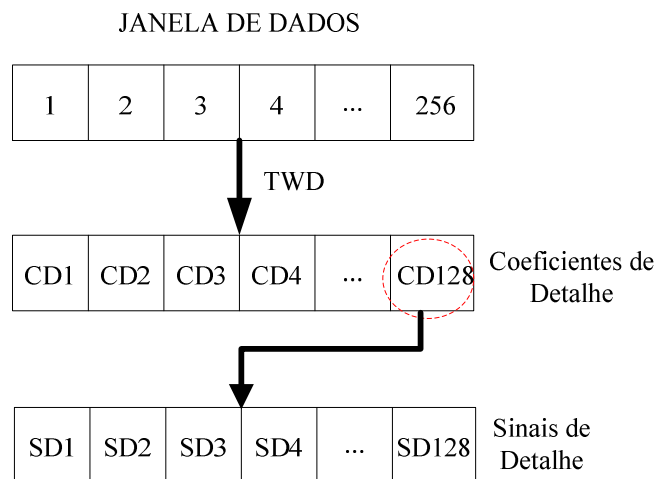


Figura 20: Janela de dados para análise dos sinais.

Bloco 4: Discriminação e Classificação de Transitórios

Como mencionado anteriormente, conforme os dados de correntes das fases vão sendo decompostos pela TWD, os vetores dos SD vão recebendo a última posição dos coeficientes de detalhes das suas respectivas fases. Nessa etapa do algoritmo é calculada a variação dos dados atribuídos ao vetor dos SD através da equação 1.35.

$$\Delta SD_{ABC} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [SD(i) - \overline{SD}]^2} \quad (1.25)$$

Onde N é o número de amostras, SD os sinais de detalhes e \overline{SD} a média dos sinais de detalhes.

Cabe salientar que o cálculo de ΔSD é feito conforme os dados vão chegando ao vetor dos sinais de detalhes, ou seja, não é necessário ter as 128 amostras para ser feito o cálculo de ΔSD . Com isso, o sistema de proteção torna-se rápido na identificação dos transitórios, podendo discriminar tais situações já nos primeiros dados.

No próximo passo do Bloco 4, o algoritmo verifica o valor das ΔSD com um limiar de ativação pré-definido para as fases ABC (th), determinado em $th = 0,05$. Esse limiar de ativação foi obtido a partir de testes e observação dos valores de variação dos sinais de detalhes para as situações simuladas.

Quando o limiar de ativação de qualquer fase é extrapolado, o contador CT é incrementado em 1, e após, verificado se é maior ou igual a 3. Caso CT não seja maior ou igual a 3 o algoritmo segue recebendo dados e analisando. O contador CT só será maior ou igual a 3 se três dados consecutivos de ΔSD extrapolarem o limiar de ativação, caso não seja, o contador recebe zero e reinicia a contagem. A função desse contador é evitar interpretações errôneas e a consequente atuação da proteção por variação de apenas 1 dado dos sinais de detalhes. Nas simulações observou-se que quando três dados consecutivos de ΔSD extrapolam o limiar, caracteriza-se uma falta interna.

Sendo $CT \geq 3$, é verificado se há corrente no secundário do transformador para determinar se trata-se de uma energização com falta interna, quando $I_S=0$, ou falta interna para $I_S \neq 0$. Com isso o algoritmo classifica o transitório com uma mensagem ao operador, "*Energização com Falta Interna*" ou "*Falta Interna*", e envia um sinal para atuação da proteção.

Outra situação que pode ocorrer é ser calculada a ΔSD , porém não haver extrapolação do limiar de ativação. Com isso, o algoritmo atribui zero para o contador CT e analisa se há corrente no secundário do transformador de potência. Caso I_S seja igual a zero, o algoritmo classifica como "*Correntes de Inrush*", e restringe a operação. Caso contrário o algoritmo classifica como "*Transitório Externo*", enviando um sinal de restrição para a proteção. Em ambos os casos é enviada uma mensagem ao operador e o sistema continua funcionando e recebendo novos dados para análise.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados dos testes realizados no algoritmo de proteção proposto.

4.7 Considerações finais

A capacidade de identificação e discriminação dos transitórios envolvendo o transformador de potência é fundamentada a partir da análise e monitoramento da variação dos sinais de detalhes (ΔSD). O funcionamento do algoritmo mostra-se simples e rápido na discriminação dos surtos, pois analisa e monitora os dados de ΔSD conforme vão chegando ao vetor, tendo ainda uma implementação relativamente simples.

5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SEP

5.1 Considerações gerais

Os softwares de simulação permitem simular diversas situações que ocorrem em um sistema elétrico, dentre elas os diversos tipos de transitórios. O software ATP/EMTP (*Alternative Transients Program*) é amplamente conhecido na área de estudos de Sistemas Elétricos de Potência devido a sua qualidade e flexibilidade para a simulação de transitórios. O desenvolvimento de um circuito de simulação mais próximo do real é de extrema importância para a obtenção de dados e validação de metodologias de proteção.

Outra questão importante para a validação de metodologias/algoritmos é o correto processamento dos dados de entrada, pois ruídos ou defasagens dos ângulos das fases pode levar a cálculos e interpretações errôneas.

5.2 Introdução ao ATP

Este trabalho contou com a utilização do software ATP para a implementação do sistema elétrico que é composto por uma fonte equivalente, dois transformadores trifásicos de dois enrolamentos de 25 MVA, dois transformadores de corrente, uma linha de transmissão de 5 km de extensão, chaves e uma carga indutiva.

O software ATP tem sua origem do programa EMTP (Electro-Magnetic Transients Program), desenvolvido a partir da década de 60 por Herman W. Dommel para a Bonneville Power Administration (BPA). Inicialmente o software trabalhava somente simulando circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, capacitâncias e resistências em linhas sem perdas, com uma chave e fonte de excitação (BERNARDES, 2006). No ano de 1973, Scott Meyer assumiu a coordenação e o desenvolvimento do programa na BPA, fazendo com que o desenvolvimento do software fosse em conjunto com os usuários do EMTP, tornando-o uma ferramenta poderosa em estudos de transitórios em sistemas

elétricos. Após algumas divergências entre Scott Meyer e o EPRI - Electric Power Research Institute (investiu no projeto do EMTP a partir de 1984), levaram a criação de uma nova versão do EMTP, dando origem na Bélgica na Leuven EMTP Center (LEC) ao ATP (Alternative Transients Program).

O ATP é um software livre de royalties, porém não é de domínio público, sendo que seus manuais e pacotes somente podem ser obtidos após assinatura de um contrato entre o usuário e os representantes do grupo de usuários autorizados (ATP, 1987).

No software ATP existem diversos componentes que permitem a simulação de circuitos complexos, dentre eles:

- Elementos R, L, C;
- Elementos não-lineares;
- Fontes de tensão e corrente do tipo degrau, rampa, senoidal, etc.;
- Transformadores;
- Cabos e linhas de transmissão;
- Máquinas síncronas trifásicas e motores universais;
- Chaves (simples, estáticas, dependentes de tensão ou tempo);
- Diodos, tiristores e triacs;
- Entre outros.

Outra característica importante do ATP é a utilização de módulos para simulação de elementos lógicos, as TACS e MODELS, e várias rotinas auxiliares de suporte. O TACS é utilizado para simular interações dinâmicas entre a rede elétrica e os sistemas de controle de um determinado equipamento do circuito. Já o MODELS é um módulo que representa uma versão mais moderna das TACS, sendo que apresenta vantagens na representação de sistemas de controle complexos (BRANCO, 2009).

As rotinas auxiliares de suporte permitem a geração de dados e/ou cálculos de parâmetros para a simulação de um sistema elétrico, tais como:

- LINE CONSTANTS, CABLE CONSTANTS e CABLE PARAMETERS - Cálculo de parâmetros de linhas e cabos;

- JMARTI SETUP e SEMLYEN SETUP – Geração de dados de entrada para modelos de linhas dependentes de frequência;
- SATURATION e HYSTERESIS – Rotinas para obtenção de características de saturação e magnéticas de transformadores;
- XFORMER e BCTRAN – Cálculo de parâmetros R e L de transformadores.

O ATP possui duas maneiras de simulação de circuito, uma utilizando a entrada dos dados por “cartões”, contendo todas as informações do circuito a ser simulado. A outra forma é através do ATPDraw, que permite a inserção de elementos gráficos (resistências, indutâncias, fontes, transformadores, etc) para a montagem do circuito a ser simulado. Para um maior entendimento das aplicações, sugere-se que seja consultada a documentação do ATP, o *ATP Rule Book* (ATP, 1987), onde contém todas as informações para os diversos modelos disponíveis.

5.3 O Sistema Elétrico Implementado

Com o objetivo de testar o algoritmo proposto foram obtidos dados a partir de um sistema elétrico modelado no software ATP/EMTP, como mostra a Figura 21. O sistema elétrico é composto por uma fonte equivalente de 138 kV, potência nominal de 30 MVA e frequência de 60 Hz, conectado a dois transformadores de potência trifásicos de 25 MVA conectados em paralelo, relação de transformação de 138 kV para 13.8 kV, com ligação triângulo-estrela aterrado. Também compõe o sistema dois transformadores de corrente (TC) para medição das correntes do lado primário e secundário do transformador de potência, sendo uma relação de transformação no primário de 200:5 e no secundário de 2000:5. Uma pequena linha de distribuição com 5 km de extensão conecta os transformadores a uma carga de 10 MVA, fator de potência 0,92 indutivo.

Para a simulação de diferentes situações de operações foram inseridas chaves no sistema elétrico (CH1, CH2, CH3, CH4, CH5, CH6, CHREGPR1, CHREGPR2, CHP, CHPXTR e CHLD), Figura 27.

A ligação entre os TC's e o transformador de potência foram feitas para não haver a compensação do deslocamento angular proveniente da ligação Δ -Y do

transformador de potência, sendo que a defasagem será corrigida no algoritmo proposto.

Cabe ressaltar que todos os componentes do sistema elétrico foram modelados na forma de cartões de simulação para o software ATP. A seguir serão apresentadas algumas características individuais dos componentes. No anexo A é apresentado um exemplo de cartão de entrada de simulação do ATP.

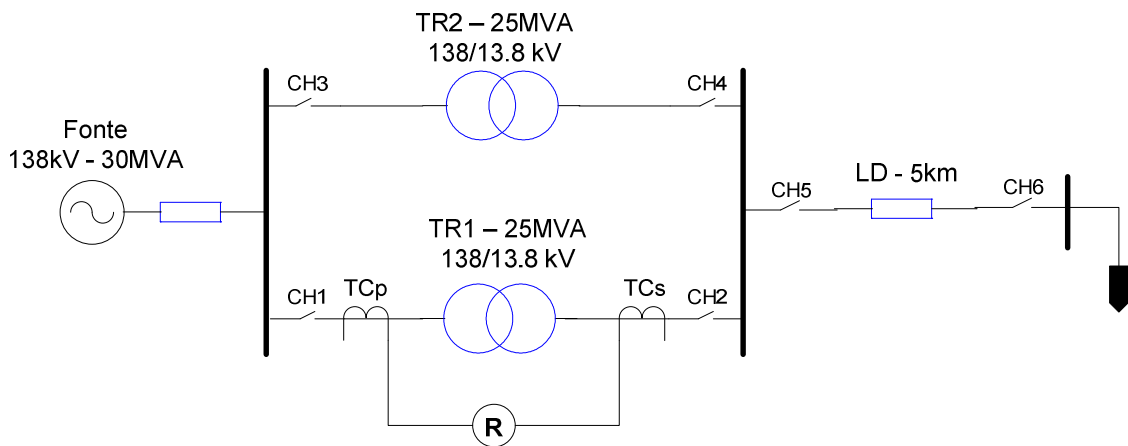


Figura 21: Sistema elétrico analisado.
Fonte: Adaptado de BERNARDES, 2006

5.3.1 Gerador (Fonte Equivalente)

O sistema elétrico modelado é composto por uma fonte equivalente responsável pelo fornecimento de energia elétrica ao sistema conectado a ele. A tensão de 138 kV e frequência de 60 Hz da fonte equivalente permanecem fixas durante as situações simuladas.

Para a representação do gerador, utilizou-se uma modelagem simplificada no ATP, sendo escolhida a fonte *Type 14* (ATP, 1987), fonte do tipo cossenoidal. A tensão fornecida pelo gerador é dada pela equação 1.21.

$$V(t) = V_m * \cos(2\pi ft + \varphi) \quad (1.26)$$

Sendo que:

V_m – valor da tensão de pico.

f – frequência (Hz).

t – tempo (s).

φ - defasagem angular.

Na Tabela 1 são apresentados os dados da fonte equivalente no cartão de entrada do ATP.

Tabela 1: Parâmetros da fonte equivalente.

Parâmetro	Valor
Resistência de sequência zero (R_0)	7,596 Ω
Resistência de sequência positiva (R_+)	7,1003 Ω
Indutância de sequência zero (L_0)	115,45mH
Indutância de sequência positiva (L_+)	53,99mH

5.3.2 Transformador de Potência

Os transformadores exercem um papel importante no SEP, sendo responsáveis pela interligação entre os ramos do SEP (geração, transmissão e distribuição), além de determinar os níveis de tensões, elevando ou diminuindo a tensão (BARBOSA, 2010).

Neste trabalho, empregou-se a modelagem completa via ATP (*saturable*) para representar os transformadores de potência, incluindo a relação de transformação, curva de saturação e conexões dos enrolamentos delta e estrela. Nas Figura 22 e Figura 23 são apresentados o modelo do transformador utilizado no ATP e a curva de saturação do núcleo do transformador, respectivamente. Para a simulação do sistema elétrico, foi considerada uma modelagem de três transformadores monofásicos para constituir um sistema trifásico de 138 kV para 13,8 kV, conexão Δ -Y aterrado.

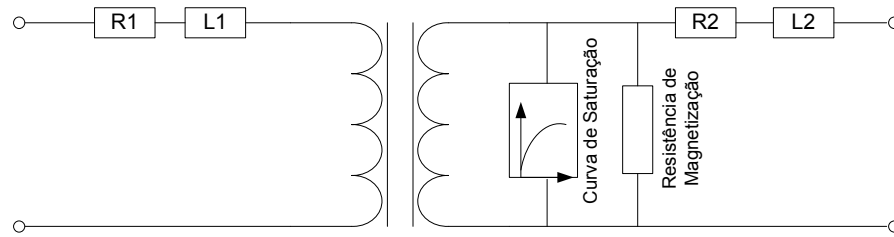


Figura 22: Modelo do transformador (*saturable*) monofásico utilizado no ATP.

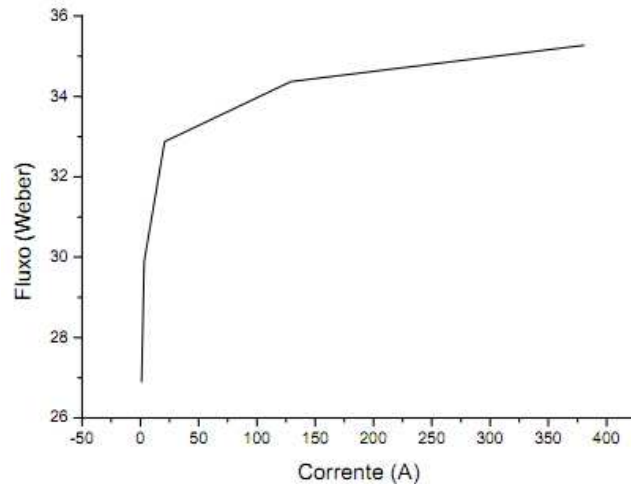


Figura 23: Curva de saturação do transformador de potência.
Fonte: retirada de BERNARDES, 2006.

Para poder simular as situações de faltas internas mais detalhadamente, os enrolamentos dos transformadores, tanto do primário quanto do secundário, foram divididos em percentagens do total (10%, 50% e 80%), sendo tomado como referência o terminal da fase para o lado delta e o neutro para o lado em estrela, Figura 24.



Figura 24: Divisão em percentagem dos enrolamentos primário (Δ) e secundário (Y).

Nas Tabela 2 e Tabela 3 são apresentados os dados referente a divisão dos enrolamentos do primário e secundário que foram utilizados nos cartões de simulação do ATP para a situação de faltas internas.

Tabela 2: Divisão dos enrolamentos primário (Δ), em 10%, 50% e 80%.

Denominação dos nós (ATP)	Percentagem do enrolamento primário	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Tensão (kV)
TPRA-N10TA	10%	0,1048	9,084	13,80
N10TA-N50TA	50%	0,4192	36,332	55,20
N50TA-N80TA	80%	0,3144	27,249	41,40
N80TA-TPRB	20%	0,2096	18,166	27,60

Tabela 3: Divisão dos enrolamentos secundário (Y), em 10%, 50% e 80%.

Denominação dos nós (ATP)	Percentagem do enrolamento secundário	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Tensão (kV)
TSECA-N80EA	20%	0,00350	0,3028	1,5934
N80EA-N50EA	80%	0,00525	0,4542	2,3901
N50EA-N10EA	50%	0,00700	0,6056	3,1868
N10EA-NEUT1	10%	0,001750	0,1514	0,79670

5.3.3 Transformadores de Corrente (TC)

Os transformadores de corrente são equipamentos de grande importância para o sistema de proteção, pois permitem que os equipamentos de medição e proteção funcionem com um nível de corrente bem abaixo da corrente nominal do sistema.

Para a representação dos TC's, foi utilizado o modelo do transformador saturável do software ATP conectado em estrela em ambos os lados do transformador de potência, como mostra a Figura 25. Isso faz com que se mantenha

a defasagem angular de 30° da ligação Δ -Y aterrado do transformador de potência. Normalmente essa defasagem é corrigida ligando o TC do lado em Δ do transformador de potência em Y, e o TC do lado em Y do transformador de potência em Δ . No entanto, a correção da defasagem será feita no algoritmo proposto neste trabalho.

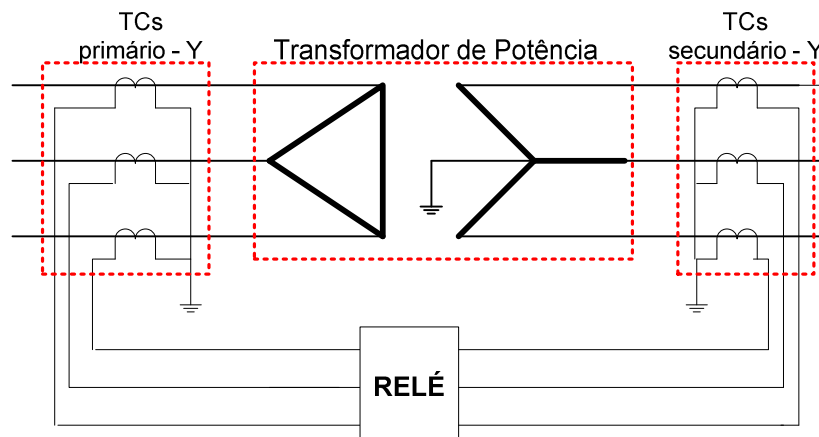


Figura 25: Esquema de conexão dos TCs.
Fonte: Adaptado de BARBOSA, 2010.

A relação de transformação dos TC's foi de 200:5, para o primário (alta tensão), e 2000:5 para o secundário (baixa tensão). Para melhor representar os TC's e o sistema a ser simulado, foi considerada a curva de saturação e demais parâmetros, como mostram a Figura 26 e a Tabela 4, respectivamente. Embora haja diferença na relação de transformação dos TC's utilizados, os parâmetros dos equipamentos são os mesmos (BERNARDES, 2006)(BARBOSA, 2010).

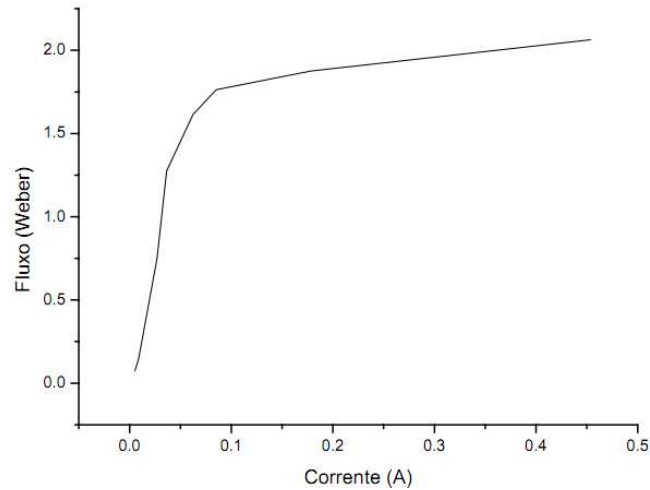


Figura 26: Curva de saturação dos transformadores de corrente.
Fonte: retirado de BERNARDES, 2006.

Tabela 4: Parâmetros para os TC's.

Parâmetro	Valor
Indutância de dispersão do primário	$1,0 \times 10^{-4} \text{H}$
Resistência de dispersão do primário	$0,85 \Omega$
Indutância de dispersão do secundário	$1,0 \times 10^{-4} \text{H}$
Resistência de dispersão do secundário	$1,0 \times 10^{-4} \Omega$

5.3.4 Linha de Distribuição

Foi considerada uma linha de distribuição de 13,8 kV e 5 km de comprimento. Os parâmetros de entrada no cartão de simulação do ATP são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros para os TC's.

Parâmetro	Valor
Resistência de sequência zero (R_0)	$0,7186 \Omega$
Resistência de sequência positiva (R_+)	$0,3101 \Omega$
Indutância de sequência zero (L_0)	$11,45 \text{mH}$
Indutância de sequência positiva (L_+)	$2,41 \text{mH}$

5.3.5 Carga

Uma carga com valor de 10 MVA conectada em estrela é alimentada pelo sistema elétrico em questão. Os dados da carga foram obtidos da seguinte forma:

- S = 10MVA
- U = 13,8kV
- Fator de Potência = 0,92 indutivo

Com esses dados é possível calcular a impedância da carga:

$$Z = \frac{U^2}{S} \quad (1.27)$$

Com isso, obtemos:

$$Z = \frac{(13,8 \times 10^3)^2}{10 \times 10^6} = 19,044 \Omega \quad (1.28)$$

A partir do fator de potência, pode-se encontrar a resistência (R) e a indutância (L) da carga:

$$R = |Z| \cdot \cos(\theta) \quad (1.29)$$

$$X = |Z| \cdot \text{sen}(\theta) \quad (1.30)$$

Como:

$$\theta = \arccos(0,92) \rightarrow \theta = 23,07^\circ \quad (1.31)$$

Com isso, tem-se que:

$$R = 17,520 \Omega \quad (1.32)$$

$$L = 19,789 \text{mH} \quad (1.33)$$

5.4 Situações Simuladas

Para validação do algoritmo proposto foram simuladas diferentes situações, tais como:

- Energização do transformador (TR1);
- Energização do transformador com falta interna no primário e secundário;
- Falta interna no primário e secundário;
- Falta externa no primário e secundário;
- Sobre-excitação;
- Energização solidária (TR1 e TR2);

Nas situações de falta, foram simuladas faltas monofásicas (fase A-T), bifásicas (fases AB) entre espiras, bifásicas (AB-T) envolvendo a terra e trifásicas (ABC-T). As faltas internas foram realizadas em percentagens de espiras do transformador de potência (10%, 50% e 80%), com valores de resistência, indutância e tensão relativas à terra, tanto do lado primário quando do secundário, como mostram as Tabela 2 e Tabela 3. Sendo que foram consideradas faltas nas espiras de uma fase e entre espiras (fases).

Situações de falta interna dentro da região protegida, ou seja, entre os TCs primário e secundário, e o transformador de potência, foram realizadas considerando uma resistência de falta de $0,1\Omega$ consideradas.

As faltas externas foram realizadas em três pontos do sistema elétrico: 1) Antes do TC primário (fora da região protegida); 2) Próximo ao TC do lado secundário (fora da região protegida); 3) Na linha de distribuição.

Na condição de sobre-excitação foi considerado um aumento na tensão de alimentação do transformador de 110%, 120%, 130% e 140% em relação à tensão nominal.

Para a simulação da condição de energização solidária, considerou-se que o transformador TR1 já estava energizado e então energizou-se transformador TR2. Ambos os transformadores estavam em vazio.

Na Figura 27 é apresentado o sistema simulado com os locais das situações de faltas e na Tabela 6 é apresentada a quantidade de casos simulados por tipo de transitório.

Cabe salientar que em todas as situações simuladas foi variado o ângulo de incidência de tensão/falta em 0°, 45°, 60° e 90°. Na Tabela 7 são mostrados os instantes de tempo de chaveamento para obtenção dos ângulos de incidência.

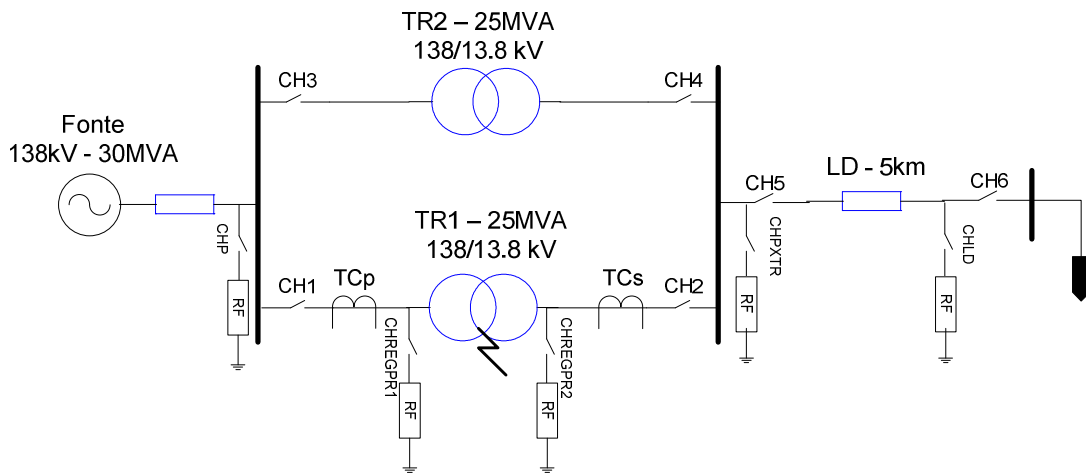


Figura 27: Esquema com as condições de faltas aplicadas ao sistema elétrico.

Tabela 6: Quantidade de casos simulados.

Situação	Ângulo de Incidência (°)	Tipo de Falta	Percentagem Enrolamento (%)	Resistência de Falta (Ω)	Total de Casos
Energização (Inrush)	0-45-60-90	X	X	X	4
Energização Solidária	0-45-60-90	X	X	X	4
Sobre-excitação (110%,120%,130% e 140%)	0°	X	X	X	4
Energização com Falta Interna 1º e 2º	0-45-60-90	A-T, AB, AB-T, ABC-T	10-50-80	X	96
Energização com Falta Externa 1º e 2º	0-45-60-90	A-T, AB, AB-T, ABC-T	X	0,1	32

Energização com Falta Interna dentro Reg. Prot. 1º e 2º	0-45-60-90	A-T, AB, AB-T, ABC-T	X	0,1	32
Falta Interna 1º e 2º	0-45-60-90	A-T, AB, AB-T, ABC-T	10-50-80	X	96
Falta Externa 1º e 2º	0-45-60-90	A-T, AB, AB-T, ABC-T	X	0,1	48
TOTAL					316

Tabela 7: Ângulos e tempos para incidência de tensão/falta.

Ângulo	Tempo (s)
0°	0,1468
45°	0,1490
60°	0,1497
90°	0,1515

5.5 Pré-processamento dos Sinais

Os dados provenientes dos TCs do sistema modelado precisam ser pré-processados para adequar os mesmos aos cálculos do algoritmo de proteção. Procedimentos como filtragem do sinal, correção da defasagem dos sinais de correntes originárias do primário e secundário do transformador de força, e eliminação da componente de sequência zero são necessários para garantir um bom funcionamento do algoritmo.

A seguir são apresentadas as etapas de pré-processamento dos sinais.

5.5.1 Filtragem do sinal

O Sistema Elétrico de Potência no Brasil tem uma frequência fundamental de 60Hz para os sinais de tensão e corrente. No entanto, o SEP está sujeito a condições que levam ao surgimento de frequências diferentes da fundamental, fazendo com que situações indesejadas, como a sobreposição de espectros (*Aliasing*), prejudique a operação do sistema.

Desta maneira, os sinais de altas frequências presentes podem provocar erros durante a conversão analógica/digital dos dados, levando a erros no processamento dos dados por parte do algoritmo.

Com isso, para evitar problemas com as altas frequências dos sinais de corrente, um filtro antialiasing do tipo passa-baixa com frequência de corte pré-determinada é necessário. Os filtros do tipo Butterworth são mais utilizados para cumprir essa missão, devido a algumas características como resposta em frequência muito plana, ou seja, *ripple* ou ondulações na banda passante, e também, devido a sua resposta em frequência se aproximar de zero na banda rejeitada (BRANCO, 2009).

Neste trabalho foi adotado para processamento dos sinais de correntes um filtro Butterworth de segunda ordem com uma frequência de corte de 480Hz.

5.5.2 Correção da Defasagem Angular

Os transformadores de potência apresentam defasagem angular entre os enrolamentos do primário e secundário dependendo do tipo de conexão. Na configuração Δ -Y, a qual foi utilizada nas simulações deste trabalho, os sinais das correntes do primário e secundário apresentam uma defasagem de 30° entre si. A não compensação dessa defasagem pode acarretar no surgimento de correntes diferenciais indesejáveis, afetando a eficiência do sistema de proteção.

Uma maneira usual de corrigir a defasagem angular é conectando o transformador de corrente em estrela (Y) no lado em delta do transformador de potência, e o transformador de corrente em delta (Δ) no lado com conexão em

estrela do transformador de potência. Na aplicação de relés digitais a compensação é feita diretamente no algoritmo do equipamento, utilizando normalmente uma conexão em estrela (Y) para ambos os TCs.

Neste trabalho decidiu-se compensar a defasagem angular no algoritmo, sendo os TCs conectados em estrela no primário e secundário do transformador de potência. A correção da defasagem é obtida através da multiplicação das correntes das três fases a serem compensadas por uma matriz de correção de defasagem. O (IEEE Std. C37.91, 2008) mostra como fazer a compensação de acordo com a configuração dos enrolamentos do transformador. A equação 1.29 mostra a relação de compensação:

$$\begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad (1.34)$$

Sendo I_a , I_b e I_c as correntes instantâneas dos TCs a serem compensadas e I_A , I_B e I_C as correntes já compensadas. Neste trabalho as correntes do lado delta serão compensadas. A equação 1.29 representa a formulação para a correção da defasagem de 30° , na qual foi considerada no trabalho.

5.5.3 Componente de Sequência Zero

Surtos ou faltas em um transformador podem provoca o surgimento de componentes de sequência zero nas correntes que fluem pelo equipamento. O lado conectado em delta filtra de maneira natural tal componente fazendo com a mesma circule internamente. Porém, no enrolamento em estrela, esta componente é percebida nas correntes que fluem para a carga. Com isso, pode surgir um desequilíbrio nas correntes diferenciais, fazendo com que a proteção atue de maneira incorreta.

A partir disto, a compensação da componente de sequência zero torna-se necessária para garantir um sistema de proteção eficiente. A compensação da

componente de sequência zero (I_0) será realizada no enrolamento em estrela (Y), conforme a relação a seguir (IEEE Std. C37.91, 2008):

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a - I_0 \\ I_b - I_0 \\ I_c - I_0 \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

Sendo:

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)$$

Fazendo a substituição em (1.30):

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a - \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \\ I_b - \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \\ I_c - \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \end{bmatrix} \quad (1.36)$$

Simplificando (1.31), tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1.37)$$

Sendo I_A , I_B e I_C as correntes instantâneas do enrolamento em Y, com a compensação da componente de sequência zero já realizada. I_a , I_b e I_c são as correntes do lado secundário do transformador a serem compensadas.

5.6 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada uma breve introdução sobre o software ATP que é amplamente utilizado na área de SEP. Detalhes sobre o sistema elétrico simulado e características de cada componente foram apresentadas, sempre buscando chegar o mais próximo possível de um sistema real.

Foi considerado também nesse capítulo, o pré-processamento necessário para os dados provenientes das simulações de modo a evitar erros de interpretações. Salientando-se que a correção de defasagem angular depende do tipo de conexão do transformador.

6 SIMULAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS

6.1 Considerações gerais

A complexidade na análise e identificação de transitórios no SEP justifica a necessidade de implementar um sistema para simulação o mais próximo do real possível e também de realizar as mais diversas situações de surtos em um sistema. No que diz respeito a transformadores, deve-se levar em conta itens como repartição das espiras, ângulo de incidência de tensão/falta, tipo de ligação, etc. Com isso, para por em teste o algoritmo proposto neste trabalho, realizou-se diversas simulações em um transformador de 25 MVA implementado no ATP/EMTP. Algumas dessas condições simuladas são apresentadas a seguir.

6.2 Energização do Transformador (“*inrush*”)

Durante a energização do transformador surgem correntes diferenciais com magnitudes elevadas devido a corrente de magnetização que circula no primário do transformador. Tais correntes podem levar a atuação indevida do sistema de proteção, confundindo com uma falta interna. Sendo assim, o algoritmo de proteção deve distinguir corretamente tais situações para evitar desligamentos indevidos.

Nas situações de energização simuladas, o lado secundário do transformador está em aberto, ou seja, sem carga (CH5 aberta). A chave CH1 foi fechada no instante $t=0,1468$ segundos energizando o transformador. Na Figura 28 (a) são apresentadas as correntes diferenciais das fases ABC para a situação de *inrush* com ângulo de incidência de tensão de 0° , os Sinais de Detalhes (SD) das fases em (b), e a ΔSD das fases em (c). A chave CH3 está aberta, fazendo com que o transformador TR2 esteja fora de operação.

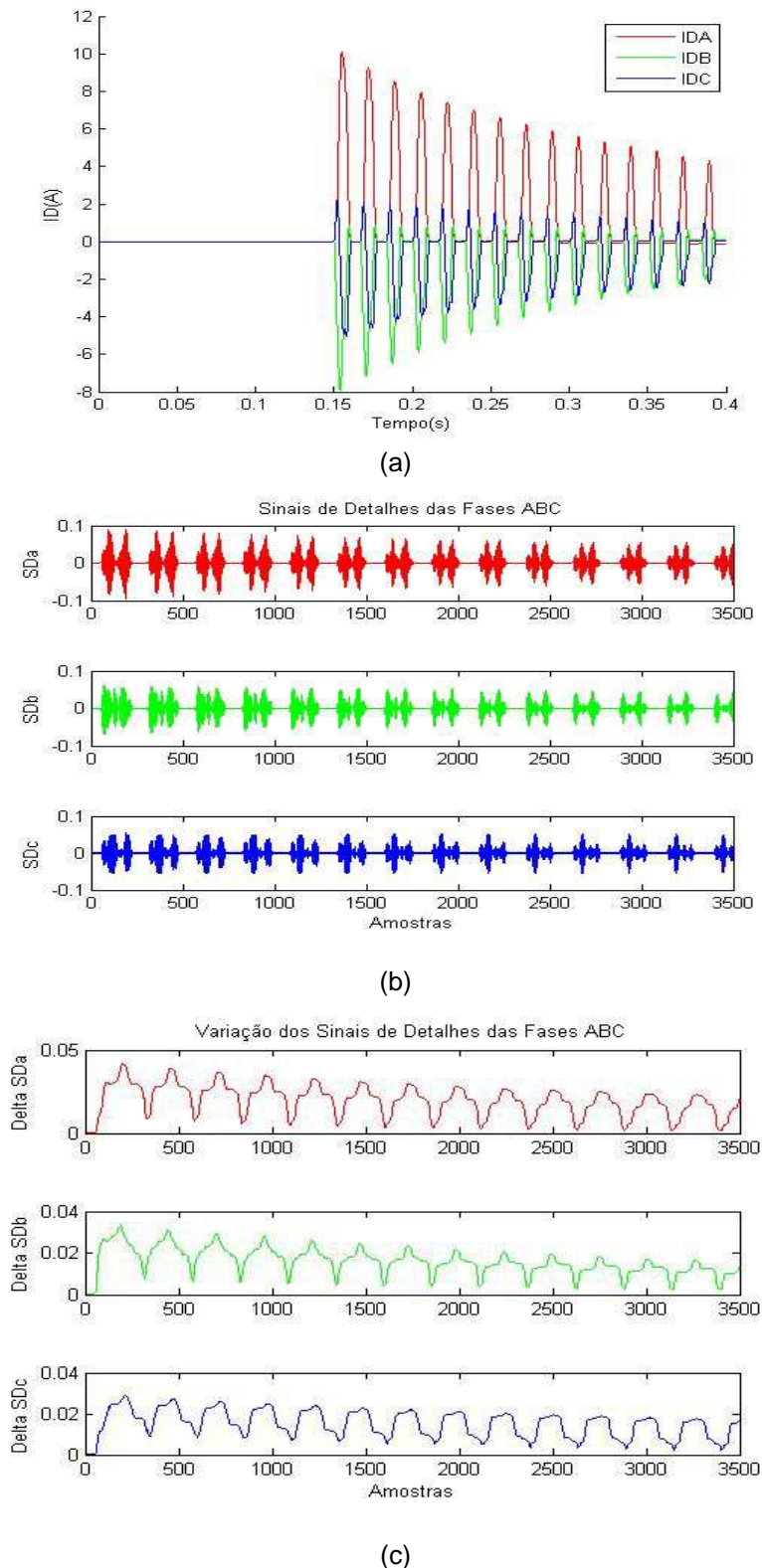


Figura 28: (a) Corrente diferencial das fases ABC para situação de energização com incidência de tensão de 0° ; (b) Sinais de Detalhes das fases; (c) Variação dos Sinais de Detalhes.

A Figura 28 (c) permite notar que durante a situação de energização do transformador a ΔSD das fases é próxima de zero, estando abaixo do limiar de

ativação pré-definido ($th=0,05$), fazendo com que o algoritmo identificasse de maneira correta tal situação mantendo o sistema em operação.

A Figura 29, mostra a classificação da situação de operação do transformador por parte do algoritmo para a situação de *inrush*. O algoritmo analisa toda a operação do sistema, classificando desde quando o transformador estava desligado até o momento de sua energização. Percebe-se que durante a transição de desligado para energização o algoritmo classificou alguns dados como em “Regime”. Isto se deve à comparação feita entre as correntes diferenciais e a corrente de operação feita no Bloco 2, pois nos primeiros dados após a energização a corrente diferencial não foi maior que a corrente de operação.

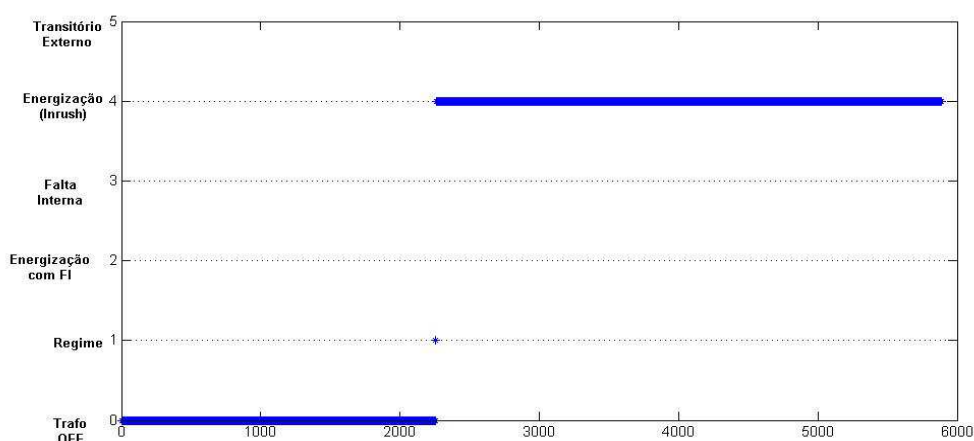
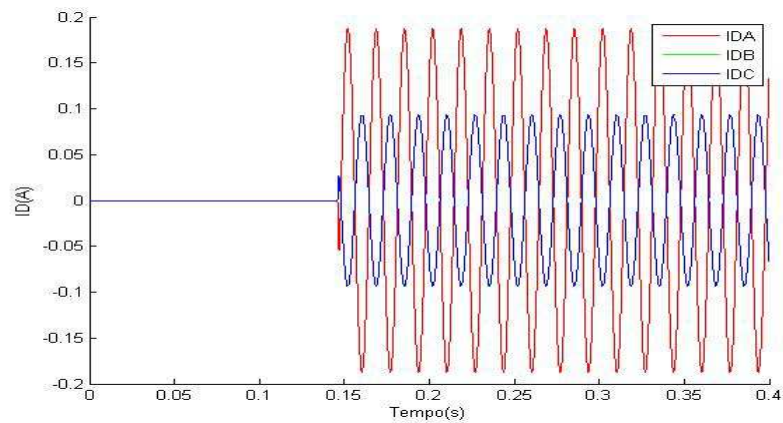


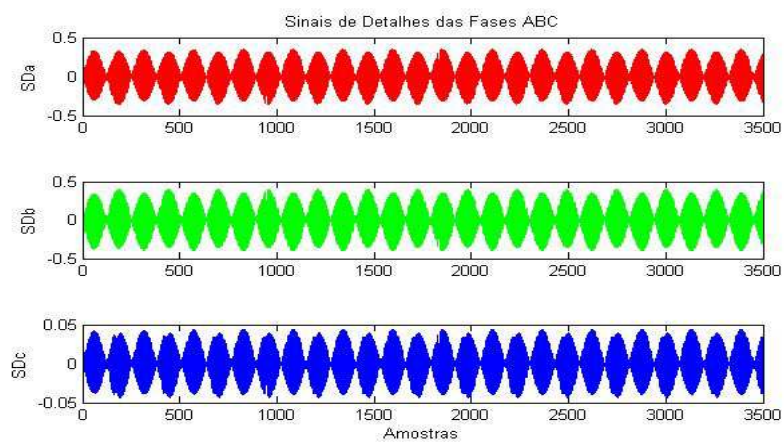
Figura 29: Monitoramento da situação de operação do transformador - Inrush.

6.3 Energização com Falta Interna

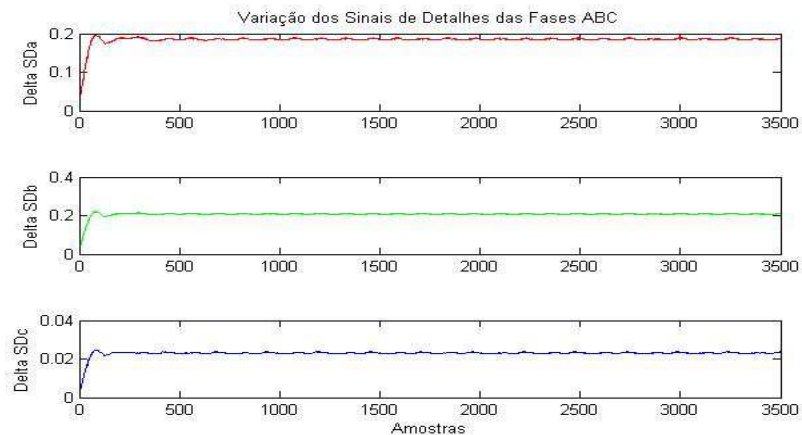
Foram simuladas situações em que o transformador estava sendo energizado com uma falta interna. Tais situações são peculiares, pois além da corrente de *inrush* há a corrente de falta, tornando mais complicada a sua identificação. Na simulação mostrada na Figura 30, a energização com falta foi realizada fechando a chave CH1 no instante $t = 0,1468$ segundos, para um ângulo de incidência de falta de 0° , assim como simulando um curto-circuito nos enrolamentos da fase A no mesmo instante. As chaves CH3 e CH5 foram mantidas abertas. Na Figura 30 (a) são apresentadas as correntes diferenciais para uma situação de energização com falta interna no secundário em 10% dos enrolamentos da fase A. No gráfico (b) mostra os SD das fases para tal situação e em (c) a Variação dos Sinais de Detalhes.



(a)



(b)



(c)

Figura 30: (a) Correntes diferenciais para situação de energização com falta interna no secundário em 10% dos enrolamentos da fase A, ângulo de incidência de 0%; (b) Sinais de Detalhes; (c) Variação dos Sinais de Detalhes.

A Figura 30 (c) permite verificar que, quando o transformador é energizado com a falta interna a ΔSD das fases A e B, já nos primeiros dados, é superior ao limiar de ativação pré-definido ($th=0,05$), porém a ΔSD da fase C não superou o limiar. No entanto, o algoritmo precisa que apenas a ΔSD de qualquer uma das

fases extrapole o limiar para atuar, com isso o algoritmo identificou de maneira correta o transitório.

A Figura 31 apresenta a classificação da operação para esse transitório. Nota-se que antes do algoritmo identificar o transitório, classificou outras duas situações, a “Regime” e a “Energização (inrush)”. A classificação de regime encaixa-se na mesma situação explicada no item anterior. Já a classificação de “Energização (inrush)” é devido ao contador CT ser incrementado em 1 porém não ser maior que 3 ainda, e assim o algoritmo classifica como “Energização (inrush)”. Cabe salientar que esse atraso na atuação do algoritmo não prejudica a sua eficiência, levando em torno de 0,2 ms para identificar o transitório.

Salienta-se que a classificação dos dados da Figura 31 segue todo o instante de tempo das simulações realizadas. Em uma aplicação real, logo após ser extrapolado o limiar e o contador CT ser maior ou igual a 3, o algoritmo enviaria um sinal para atuação da proteção.

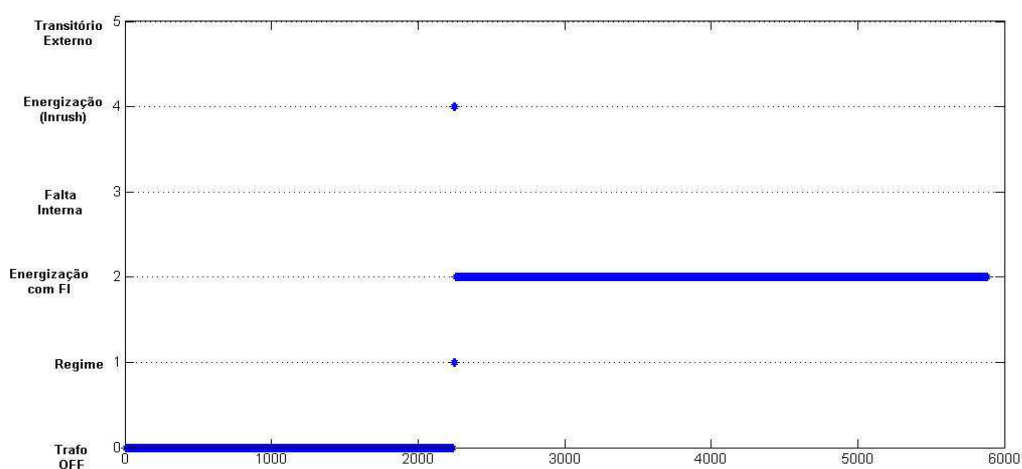
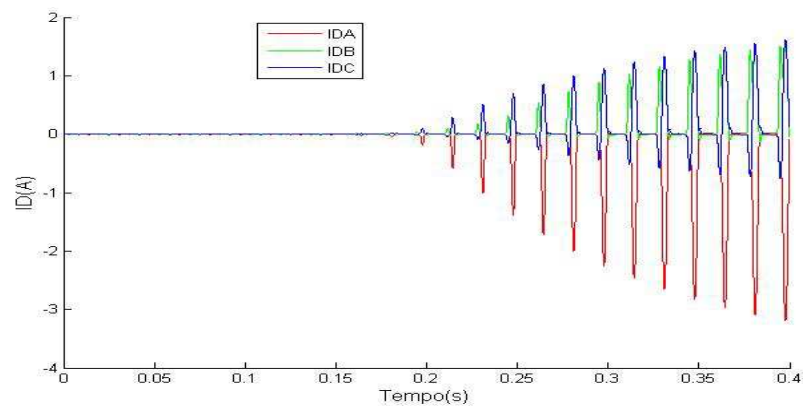


Figura 31: Monitoramento da situação de operação do transformador – Inrush com falta interna no secundário.

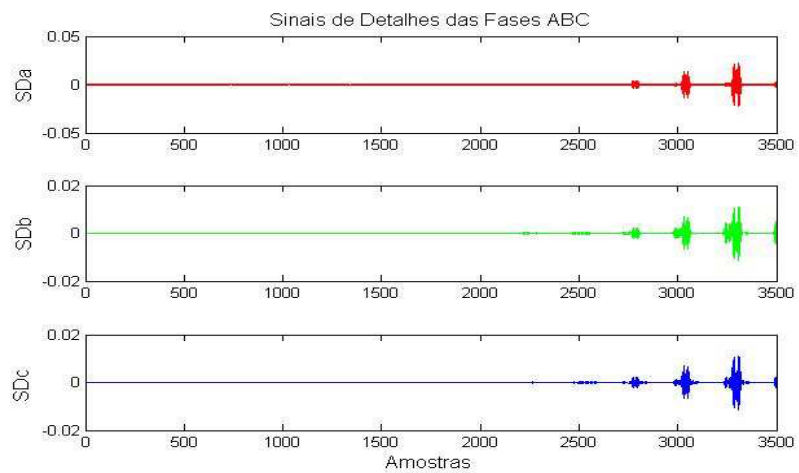
6.4 Energização Solidária (“Sympathetic Inrush”)

Para a situação de energização solidária foram considerados dois transformadores em paralelo (TR1 e TR2), sendo ambos desconectados da carga (CH2 e CH4 abertas) e o transformador TR1 já energizado. A chave CH3 foi fechada no instante $t = 0,1468$ segundos, para um ângulo de incidência de tensão de 0° . Na

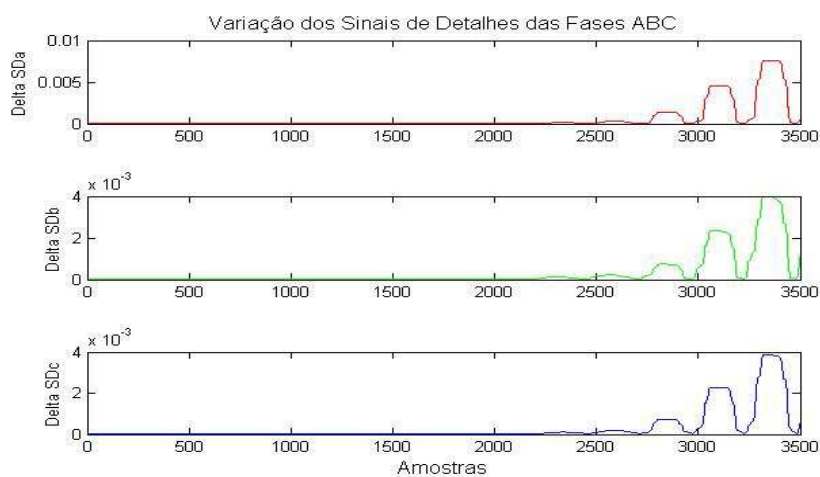
Figura 32 são apresentadas as correntes diferenciais das fases do transformador TR1 (a), (b) os Sinais de Detalhes, e a Variação dos Sinais de Detalhes (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 32: (a) Correntes diferenciais TR1 para energização solidária; (b) Sinais de Detalhes TR1; (c) Variação dos Sinais de Detalhes TR1.

A Figura 33 permite verificar que o algoritmo classificou como “Energização (inrush)” a condição simulada de energização solidária. Isto deve-se ao fato de que quando o transformador TR2 é energizado faz com que surja no TR1 um fluxo de magnetização em sentido oposto ao do TR2, provocando o surgimento da corrente de magnetização (*sympathetic inrush*) (ALENCAR, 2013). Nota-se que mesmo que no momento da energização do TR2 a corrente diferencial do TR1 seja afetada, não prejudica o funcionamento do algoritmo, sendo que a ΔSD das fases mantiveram-se abaixo do limiar de ativação.

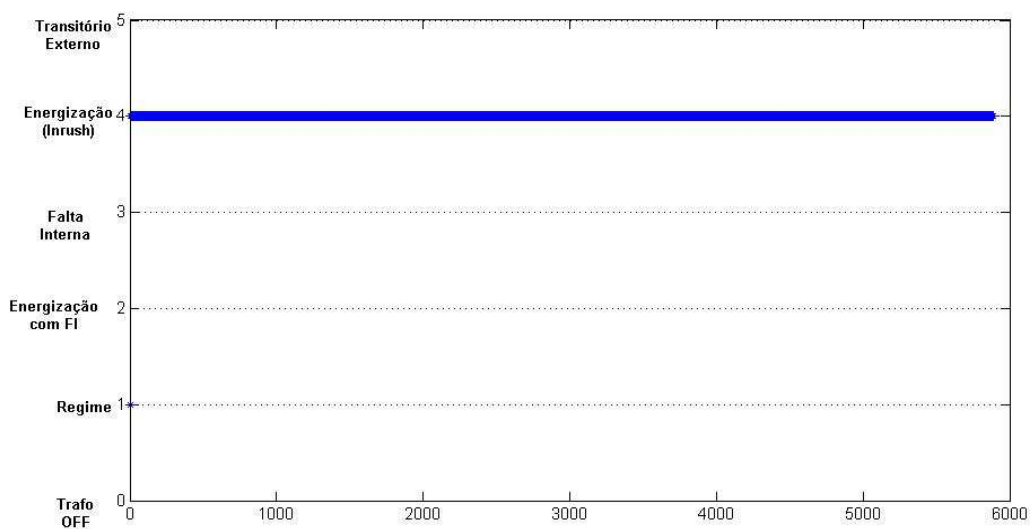
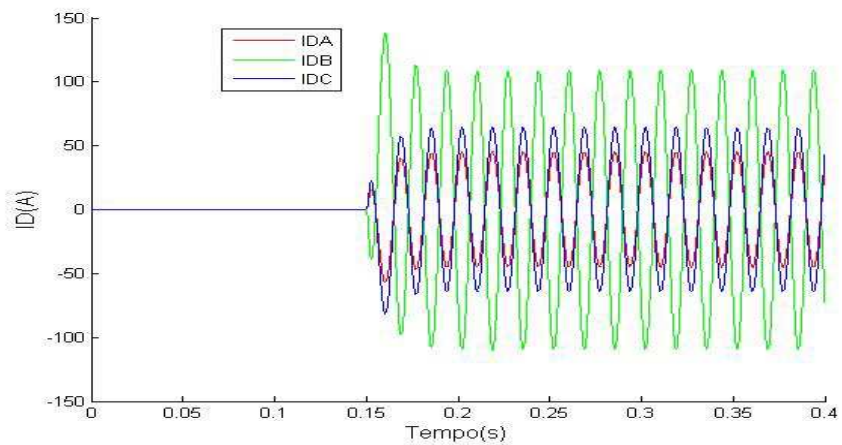


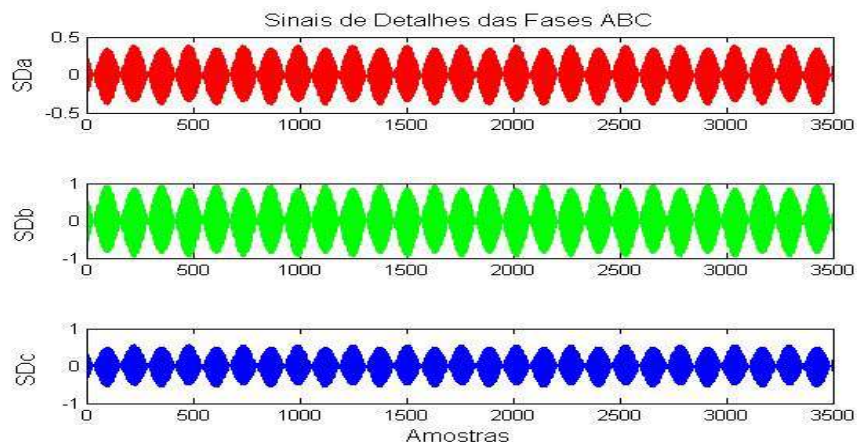
Figura 33: Monitoramento da situação de operação do transformador – Energização Solidária.

6.5 Falta Interna

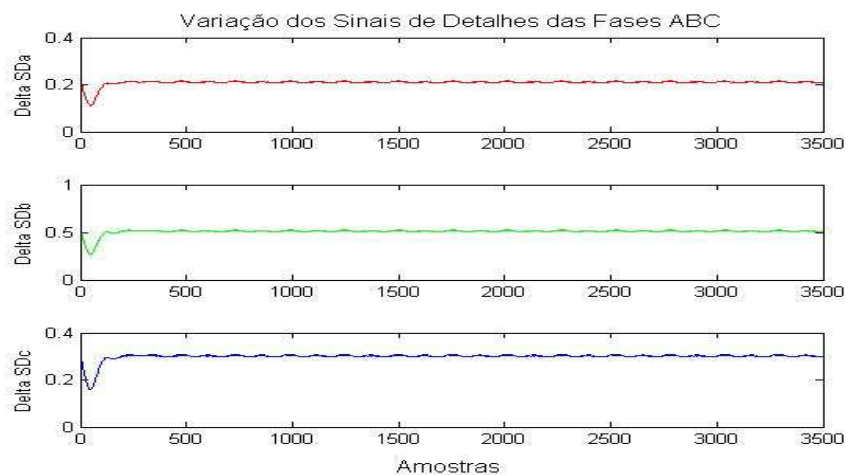
Foram testadas situações em que o transformador estava operando normalmente e logo após simula-se uma falta interna. Na situação apresentada na Figura 34, foi realizada uma falta interna no lado primário do transformador entre 10% dos enrolamentos das fases A e B com um ângulo de incidência de falta de 90°. Para tal situação foi colocado em curto-circuito os enrolamentos das fases A e B, sem envolver a terra, em um instante $t = 0,1515$ segundos.



(a)



(b)



(c)

Figura 34: (a) Correntes diferenciais para condição de falta interna no primário em 10% dos enrolamentos das fases AB, ângulo de incidência de 90° ; (b) Sinais de Detalhes; (c) Variação dos Sinais de Detalhes.

Observando a Figura 34 (c), percebe-se que a ΔSD das fases é superior ao limiar $th = 0,05$, fazendo com que o algoritmo identificasse de maneira correta a falta. Já na Figura 35, nota-se que logo nos primeiros dados o algoritmo identificou a falta, mostrando a rapidez na discriminação de transitórios.

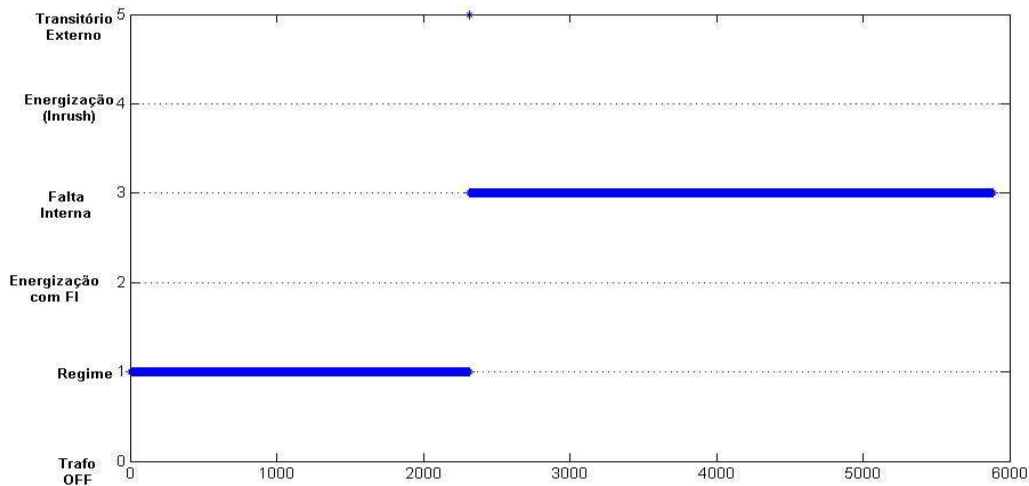
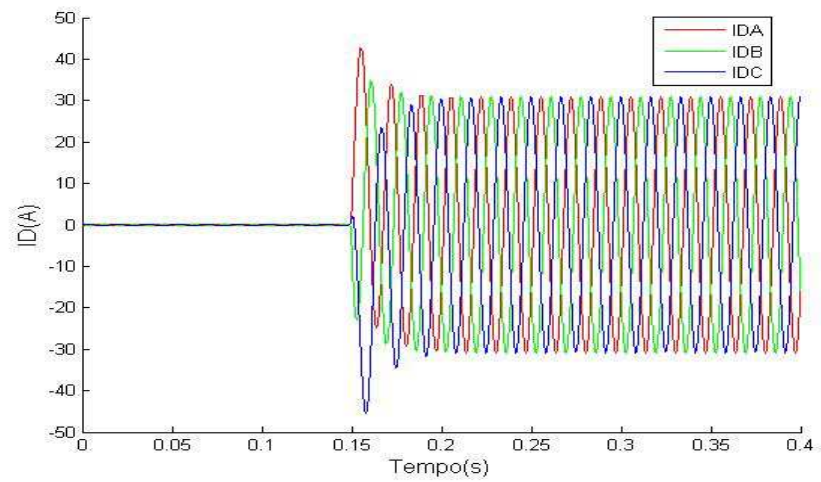


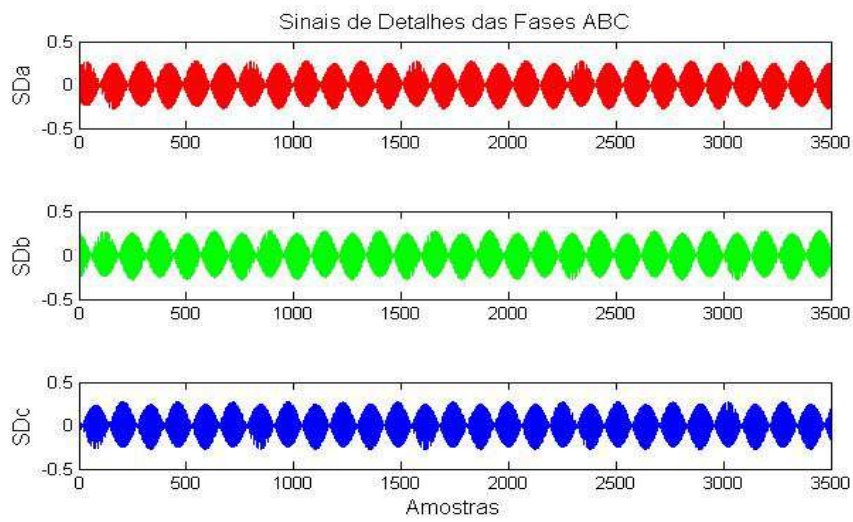
Figura 35: Monitoramento da situação de operação do transformador – Falta interna no primário 10% enrolamentos AB, ângulo 90°.

6.6 Falta Interna dentro da região protegida

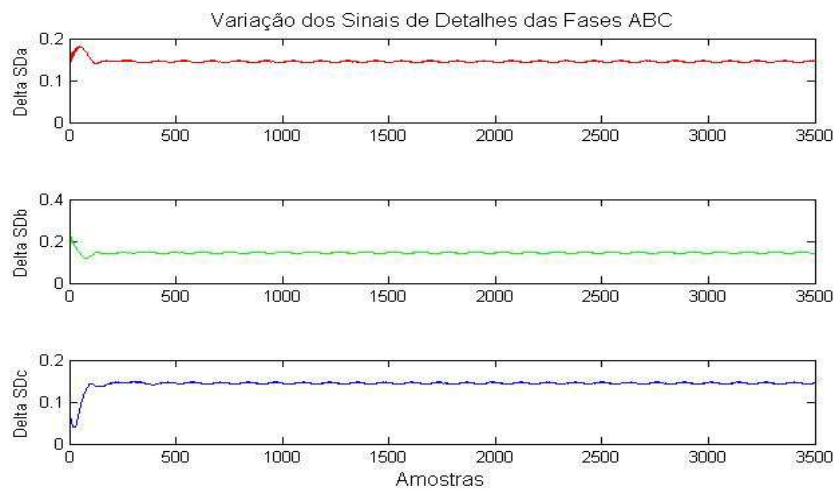
Outro tipo de falta simulada para testar o algoritmo proposto, foi uma falta interna dentro da região protegida, ou seja, entre o transformador e os TCs primário e secundário. Para realizar esse tipo de falta foi considerada uma resistência de falta de $0,1\Omega$. No instante $t = 0,1490$, foi fechada a chave CHREGPR2 (Figura 27) colocando as fases ABC do secundário do transformador em curto-circuito com a terra para um ângulo de incidência de falta de 45° .



(a)



(b)



(c)

Figura 36: (a) Correntes diferenciais para condição de falta interna na região protegida do secundário; (b) Sinais de Detalhes; (c) Variação dos Sinais de Detalhes.

O algoritmo proposto identificou corretamente a falta interna trifásica dentro da região protegida do secundário do transformador, como pode-se ver na Figura 36 (c), sendo a ΔSD das três fases superior ao limiar de ativação ($th = 0,05$). A Figura 37 mostra que logo no início da falta o algoritmo identificou o transitório, apresentando agilidade na discriminação desse tipo de curto que pode ser danoso para o SEP.

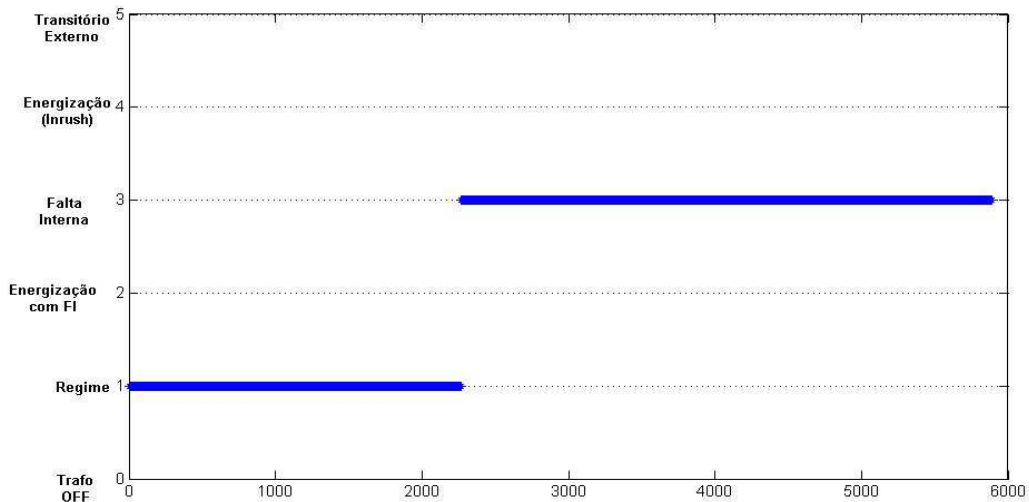
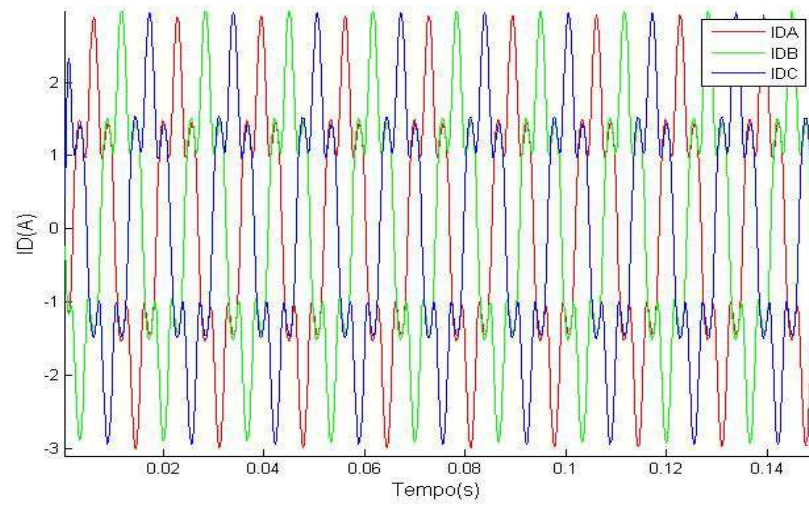


Figura 37: Monitoramento da situação de operação do transformador – Falta interna na região protegida do secundário nas fases ABC, ângulo 45°.

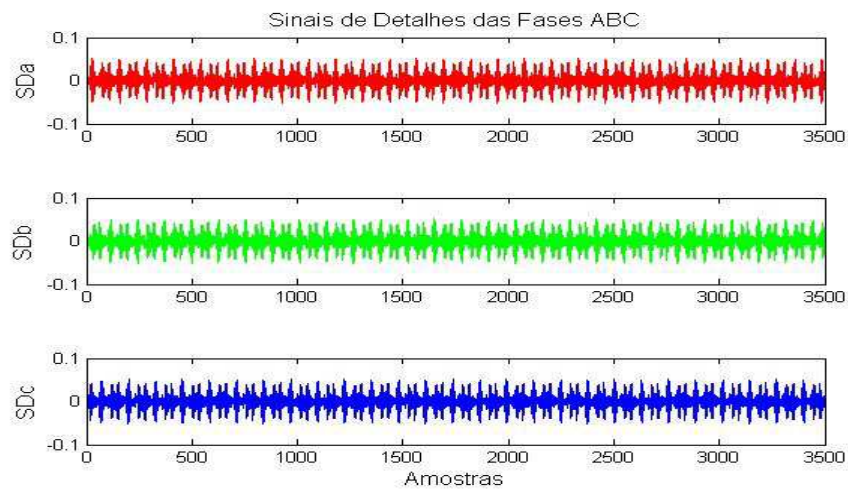
6.7 Sobre-excitação

Os transformadores estão sujeitos a diversos tipos de transitórios provenientes do SEP, entre eles a sobre-excitação. Como mencionado no Capítulo 2, quando um transformador é submetido a tensões superiores a tensão nominal surgem correntes não-lineares com harmônicas de 3ª e 5ª ordem, gerando um aumento da corrente de magnetização. Com isso, para testar o algoritmo proposto diante desse transitório, o transformador (TR1) do circuito simulado foi submetido a tensão de 110%, 120%, 130% e 140% da nominal. A chave CH3 foi mantida aberta para deixar o transformador TR2 fora de operação.

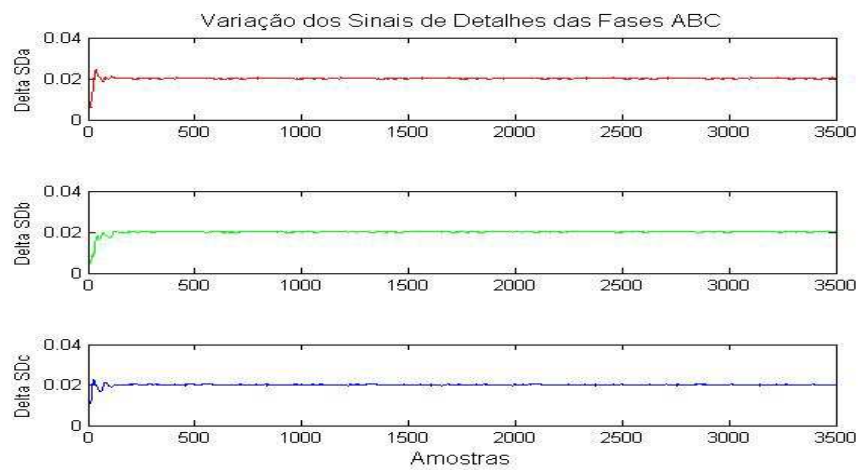
A Figura 38 (a) mostra a característica do formato de onda das correntes diferenciais para uma situação de 140% de sobre-excitação do transformador. Para melhor visualizar o formato de onda foi dado um *zoom* no gráfico das correntes, sendo que a simulação teve um tempo total de 0,4 segundos.



(a)



(b)



(c)

Figura 38: (a) Correntes diferenciais para condição de sobre excitação (140%); (b) Sinais de Detalhes; (c) Variação dos Sinais de Detalhes.

Mesmo com a distorção no formato de onda das correntes diferenciais, o algoritmo identificou corretamente a situação simulada mantendo o sistema em operação. Sendo que a ΔSD das fases não foi superior ao limiar th de ativação.

Na Figura 39, mostra que o algoritmo classificou corretamente a situação de sobre-excitação como um “Transitório Externo” desde o início da simulação.

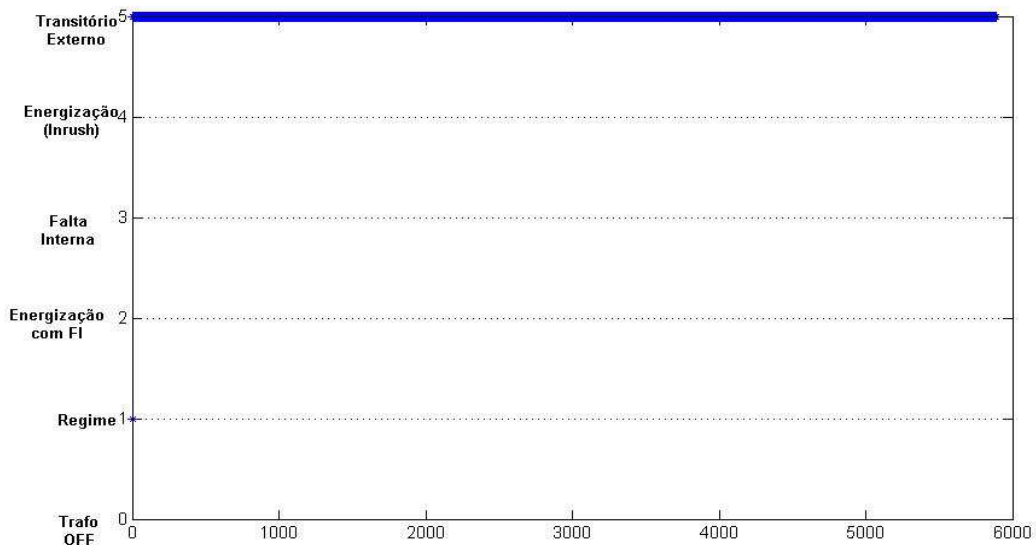


Figura 39: Monitoramento da situação de operação do transformador – Sobre excitação, 140% da tensão nominal.

6.8 Considerações finais

Para se validar uma metodologia de proteção deve-se submetê-la as mais diversas condições que pode estar sujeito o sistema analisado. Conforme apresentado, o algoritmo proposto foi submetido a diversas situações de transitórios, mostrando-se eficiente e rápido na discriminação e classificação nas simulações realizadas durante este trabalho. Foram simuladas um total de 316 condições de operação, sendo que o algoritmo conseguiu identificar e discriminar corretamente todas as situações simuladas.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

A proteção diferencial de transformadores de potência mostra-se limitada e pouco eficiente durante a ocorrência de alguns transitórios do SEP. Durante os anos foram propostas diversas metodologias para melhorar o sistema de proteção, porém, muitas não foram submetidas aos diversos transitórios que o SEP está sujeito, ou apresentam um nível de complexidade elevado, impedindo a sua implementação prática.

Este trabalho teve como foco principal desenvolver um algoritmo que identificasse e discriminasse as condições transitórias a que estão sujeitos os transformadores, trabalhando como uma rotina de tomada de decisão no relé de proteção. O algoritmo baseou-se na análise e monitoramento da variação das últimas amostras dos coeficientes de detalhes (Sinais de Detalhes) provenientes da decomposição dos dados das correntes diferenciais utilizando a TWD da família Daubechies (“db4”). Essa análise foi possível devido que em situações de energização do transformador, os Sinais de Detalhes apresentam uma variação próxima de zero. Já em situações de falta interna, os Sinais de Detalhes apresentam uma variação brusca, podendo assim diferenciar tais transitórios.

Para testar o algoritmo foi implementado um sistema elétrico no software ATP/EMTP para a obtenção de dados de diferentes condições de operação, tais como: energização (*inrush*), energização solidária, energização com falta interna e falta externa, faltas internas em 10%, 50% e 80% dos enrolamentos e dentro da região protegida, faltas externas na linha de distribuição e próximas aos TCs e sobre-excitação do transformador. Para a discriminação dos transitórios foi determinado um limiar de ativação obtido a partir de testes, sendo escolhido o valor $th = 0,05$.

No que cabe aos resultados das simulações, o algoritmo mostrou-se eficiente na discriminação dos transitórios simulados no trabalho, principalmente das situações de *inrush* e faltas internas. Observou-se que durante as condições de faltas internas a variação dos sinais de detalhes (ΔSD) foi superior ao limiar de ativação, e que durante a energização (“*Inrush*”) a ΔSD foi próxima de zero, abaixo

do limiar determinado. Outra característica a salientar foi a rápida identificação dos curtos-circuitos internos, enviando um sinal para atuação do sistema de proteção, evitando perdas e prejuízos.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Testar o algoritmo para outras condições de operação como: saturação dos TCs, remoção de cargas, conexões diferentes do transformador e da carga, tipo e potência da carga, etc;
- Implementar uma interface gráfica para a simulação e classificação de transitórios;
- Comparar a eficiência do algoritmo utilizando outras famílias de Wavelets;
- Realizar uma análise de tempo de atuação do algoritmo proposto;
- Comparar o desempenho da metodologia proposta com a metodologia tradicional da restrição por harmônicos.

Para finalizar, coloca-se que este trabalho resultou em publicação e participação nos seguintes eventos:

- 48th Universities' Power Engineering Conference – UPEC 2013, Dublin – Irlanda;
- X Latin-American Congress on Electric Power Generation, Transmission and Distribution – CLAGTEE 2013, Viña Del Mar – Chile;
- XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente – XI SBAI 2013 – Fortaleza – Ceará;

Resumo aceito para publicação:

- Congreso Internacional de Distribución Eléctrica – CIDEL 2014 – Buenos Aires – Argentina.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR R. J. N, BEZERRA U. H, **Power Transformer Differential Protection Through Gradient of the Differential Current.** Journal of Control, Automation and Electrical System, v.24, p.162-173, 2013.

ANDERSON P. M., **Power System Protection.** New York, NY. IEEE Press, 1999. 1307 p. ISBN: 0-7803-3427-2.

ATP. **Alternative Transients Program – Rule Book.** Leuven EMTP Center (LEC), 1987.

BAOMING G., ALMEIDA A. T. **An Equivalent Instantaneous Inductance-Based Technique for Discrimination Between Inrush Current and Internal Faults in Power Transformers.** IEEE Transactions Power Del., vol.20, nº4, Oct. 2005.

BARBOSA D., **Intelligent Hybrid System for Monitoring and Protection of Power Transformers.** Tese de doutorado, USP-São Carlos, Brasil, 2010.

BERNARDES A. P., **Esquema Completo de Proteção Diferencial de Transformadores para Testes em um Relé Digital.** Dissertação de mestrado, USP, Brasil, 2006.

BLACKBURN J. L., DOMIN T. J. **Protective Relaying – Principles and Applications.** 3ª Ed. Taylor & Francis Group, 2007.

BRANCO H. M. G. C., **Uma Estratégia para a Detecção e Classificação de Transitórios em Transformadores de Potência pela Utilização da Transformada Wavelet e da Lógica Fuzzy.** Dissertação de mestrado, USP, Brasil, 2009.

BRETAS G. N., COSTA ALBERTO L. F. **Estabilidade Transitória em Sistemas Eletroenergético.** São Paulo, EESC-USP, 2000. 155p. ISBN: 85-85205-31-8.

DAUBECHIES I. **The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis.** IEEE Transaction on Information Theory, New York, NY, USA. v.36, n.5, p. 961-1005, 1990.

DE MELLO F. P., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Santa Maria-RS: Imprensa Universitária – UFSM, 1979. 299 p.

DINIZ P. S. R, DA SILVA E. A., NETTO S. L. **Processamento Digital de Sinais: projeto e análise de sistemas**. Porto Alegre: Bookman, 2007. 590 p. ISBN: 85-363-0418-9.

EISSA M. M., **A Novel Digital Directional Transformer Protection Technique Based on Wavelet Packet**. IEEE Transactions Power Del., vol.20, nº3, pp.1830-1836, Jul. 2005.

EBNER A., **Transient Inrush Currents due to Closing Time and Residual Flux Measurement Deviation if Controlled Switching is Used**. ETZ Zürich, Switzerland: High Voltage Laboratory, 2007.

FILHO O. D., **Utilização da Transformada Wavelet para Caracterização de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica**. Dissertação de mestrado, USP São Carlos, Brasil, 2003.

GUIDO R. C., PEREIRA J. C., SLAETS J. F. W., **Introduction to the special issue on wavelet-based algorithms and emergent classification techniques in science and engineering**. Journal of Computational and Applied Mathematics, 227(2), 221-222, 2009.

GUZMÁN A., et al. **A Current-Based Solution for Transformer Differential Protection. Part I: problem statement**. IEEE Transactions on Power Delivery, Piscataway, EUA, v. 16, n. 4, p. 485-491, 2001.

GUZMÁN A., et al. **A Current-Based Solution for Transformer Differential Protection. Part II: relay description and evaluation**. IEEE Transactions on Power Delivery, Piscataway, EUA, v. 17, n. 4, p. 886-893, Oct. 2002.

HARLOW J. H., **Electric Power Transformer Engineering**. 2nd Edition. New York, CRC Press, 2007. ISBN: 978-0-8493-9186-6.

HOROWITZ S. H., PHADKE A. G. **Power System Relaying**. 2^o Ed., Baldock: Research Studies Press Ltd., 1995. 318 p. ISBN: 0-86380-185-4.

IEEE Std C37.91. **IEEE Guide for Protecting Power Transformer**. 2008.

JEMSE A., HARB A. C. **A Ripples in Mathematics: The Discrete Wavelet Transform**. New York: Springer-Verlag, 2000.

JIALE S., JIAO Z., SONG G., DENG X., LIU K. **A Novel Transformer Protection Principle Based on the Excitation Impedance**. School of Electrical Engineering, Xi'na Jiaotong University, Xi'na China.

JORNAL DA ENERGIA. Site de notícias sobre a geração, transmissão, distribuição, comercialização, regulação, indústria, meio ambiente, economia e política envolvendo energia elétrica. www.jornaldaenergia.com.br. Último acesso 21/01/2014.

KENNEDY B. W., **Energy Efficient Transformer**. New York: McGraw-Hill, 1998. 271 p. ISBN: 0-70-034439-6.

KUMAR N., GUPTA H., SINGH S. P. **Prototype Scheme for Differential Protection of Power Transformer using ANN**. IEEE Transactions Power Del., 2008.

LU Z., TANG W. H., LI T. Y., WU Q. H., **A Morphological Scheme for Inrush Identification in Transformer Protection**. IEEE Transactions Power Del., vol.24, nº2, April. 2009.

MARTINEZ E. V., PÉREZ RODRÍGUEZ J. A. **Aplicación de RNA em La Identificación de Corrientes de Inrush em Transformadores**. Piscataway, NJ, v. VI, n.20, p. 24-33, Jul/Sep. 2003.

MOA P. L., AGGARWAL R. K., **A Novel Approach to the Classification of the Transient Phenomena in Power Transformer using Combined Wavelet Transform and Neural Network**. IEEE Transactions Power Del., vol.16, nº4, pp.645-660, Oct. 2001.

NARENDRA K., FEDIRCHUK D., ZHANG N., MIDENCE R., PERERA N., SOOD V. **Phase Angle Comparison and Differential Rate of Change Methods used for Differential Protection of Busbars and Transformers**. IEEE Electrical Power and Energy Conference, IEEE 2011.

NGAOPITAKKUL A., KUNAKORN A., NGAMROO I. **Discrimination between External Short Circuits and Internal Faults in Transformer Windings using Discrete Wavelet Transforms.** Industry Applications Society - IAS 2005 - IEEE.

OLIVEIRA M. O., **Proteção Diferencial de Transformadores Trifásicos utilizando a Transformada Wavelet.** Dissertação de Mestrado, UFRGS, Brasil, 2009.

OLIVEIRA J. C., COGO J. R., ABREU J. P. G., **Transformadores: teoria e ensaios.** Ed. Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 1984.

RAHMATI A., SANAYE-PASAND M., **New Method for Discrimination of Transformers Internal Faults from Magnetizing Inrush Currents using Wavelet Transform.** Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008.

SANTOS E. M., **Métodos para Correção das Distorções da Forma de Onda Secundária Causadas pela Saturação de Transformadores de Corrente para Serviço de Proteção.** Dissertação de mestrado, UFSM, Brasil, 2009.

TRIPATHY M., MAHESHWARI R. P., VERMA H. K. **Power Transformer Differential Protection Based on Optimal Probabilistic Neural Network.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.25, Nº.1, January 2010.

WALKER J. S. **A Primer on Wavelets and their Scientific Applications.** Chapman & Hall – CRC. 1999.

ANEXO A

Exemplo de card de simulação do software ATP/EMTP.

```
BEGIN NEW DATA CASE
C      UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - UFSM
C      PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE
C      CENTRO DE ESTUDOS EM ENERGIA E SISTEMAS DE POTÊNCIA - CEESP
C      LABORATÓRIO DE ANÁLISE E PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS
C
C
C ARQUIVO BASE DA LINHA DE TRANSMISSÃO COM FONTE, TRAF0, TCs, L.D. e CARGAS
C
C CONDIÇÃO DE ENERGIZAÇÃO COM SECUNDÁRIO ABERTO
C
5.00E-05.4
      1      1      1      1      1      1
$VINTAGE, 1
C Resistências de falta entre Transf. pot e TC2
RFTTCA      1.000000000E-01 0.000000000E+00 0.000000000E+00      0
RFTTCB      1.000000000E-01 0.000000000E+00 0.000000000E+00      0
RFTTCC      1.000000000E-01 0.000000000E+00 0.000000000E+00      0
C Resistências de falta próxima ao transformador de potência
RFPXTA      1.000000000E-01 0.000000000E+00 0.000000000E+00      0
RFPXTB      1.000000000E-01 0.000000000E+00 0.000000000E+00      0
RFPXTC      1.000000000E-01 0.000000000E+00 0.000000000E+00      0
C Resistências de falta na Linha de Distribuição
RFLDA      1.000000000E-01 0.000000000E+00 0.000000000E+00      0
RFLDB      1.000000000E-01 0.000000000E+00 0.000000000E+00      0
RFLDC      1.000000000E-01 0.000000000E+00 0.000000000E+00      0
C Capacitâncias para balanceamento do sistema
TPRA      5.000000000E-05      0
TPRB      5.000000000E-05      0
TPRC      5.000000000E-05      0
C dados referentes a carga
CHGA      17.520E+00 19.79811000E+00 0.000000000E+00      0
CHGB      17.520E+00 19.79811000E+00 0.000000000E+00      0
CHGC      17.520E+00 19.79811000E+00 0.000000000E+00      0
C dados referentes a carga em paralelo de 15 MVA criada para cond. de rejeição
CHRJA      11.682E+00 13.19100000E+00 0.000000000E+00      0
CHRJB      11.682E+00 13.19100000E+00 0.000000000E+00      0
CHRJC      11.682E+00 13.19100000E+00 0.000000000E+00      0
C ligação do ponto NEUT do transformador
NEUT0 NN0      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00      0
NN0      1.
NEUT1 NN1      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00      0
NN1      1.
NEUT2 NN2      1.000000000E-03 0.000000000E+00 0.000000000E+00      0
NN2      1.
$VINTAGE, 0
C dados referentes ao equivalente de geração, em valores de sequência
51FONTA G1A      7.5962 115.4500000      0
52FONTB G1B      7.1003 53.99000000      0
53FONTC G1C
C dados referentes a linha de transmissão com parametros concentrados
51CH2A LDA      0.7186 11.4500E+00      0
52CH2B LDB      .31010 2.41000E+00      0
53CH2C LDC
C
C dados referentes ao TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA
C primeiro transformador
TRANSFORMER      3.019326.899TA      63000.
C <++++++> Cards punched by support routine on 14-Oct-97 11.54.14 <++++++>
C SATURATION
C 60.0      7.9674338.333333      0
C 0.7170000000E-03      0.90
C 1.45062000000E-03      1.00
C 7.97860000000E-03      1.10
C 41.1129000000E-03      1.15
C 113.777000000E-03      1.18
C      9999
1.06055811E+00 2.68995372E+01
```

```

3.28814356E+00 2.98883747E+01
2.08489263E+01 3.28772122E+01
1.29055289E+02 3.43716309E+01
3.80764491E+02 3.52682821E+01
          9999
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1TSECA NEUT1          0.0175 1.514 7.967
2TPRA N10TA          .1048 9.083 13.80
3N10TA N50TA          .419236.332 55.20
4N50TA N80TA          .314427.249 41.40
5N80TA TPRA          .209618.166 27.60
C
C segundo transformador
TRANSFORMER TA          TB
1TSECB NEUT1
2TPRB N10TB
3N10TB N50TB
4N50TB N80TB
5N80TB TPRA
C
C terceiro transformador
TRANSFORMER TA          TC
1TSECC NEUT1
2TPRC N10TC
3N10TC N50TC
4N50TC N80TC
5N80TC TPRB
C final da descrição do transformador
C
C Dados referentes ao TC1 - TC do lado primário do Transt. de pot.
C
TRANSFORMER          2.8E-32.6E-2TC1A
C <++++++> Cards punched by support routine on 05-Apr-05 16.21.41 <++++++>
C SATURATION
C C fr      vbase      sbase          tipo out
C 60.0      1.00E-031.00E-06          0
C C 34567890123456789012345678901234567890
C C      Irms(pu)          Vrms(pu)
C 0.2000000000E-02          7.00
C 4.0000000000E-03          20.00
C 6.0000000000E-03          35.00
C 7.0000000000E-03          43.00
C 1.0000000000E-02          75.00
C 2.0000000000E-02          200.00
C 2.8000000000E-02          340.00
C 4.0000000000E-02          430.00
C 5.0000000000E-02          470.00
C 8.0000000000E-02          500.00
C 2.0000000000E-01          550.00
C          9999
C
2.82842712E-03 2.62592259E-02
5.25107738E-03 7.50263597E-02
8.05200092E-03 1.31296129E-01
9.37604273E-03 1.61306673E-01
1.30507689E-02 2.81348849E-01
2.69326991E-02 7.50263597E-01
3.63934345E-02 1.27544811E+00
6.23407710E-02 1.61306673E+00
8.51843969E-02 1.76311945E+00
1.78251034E-01 1.87565899E+00
4.53547317E-01 2.06322489E+00
          9999
C
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
1TC1SA NEUTO          1.2 .001 200.
2CH1A TPRA          .0001 .1 5.
C

```

```

C segundo tranformador - FASE B DO TC LADO PRIMÁRIO DO TRANSF. DE POT. -
  TRANSFORMER TC1A          TC1B
  1TC1SB NEUT0
  2CH1B TPRB
C
C terceiro transformador - FASE C DO TC LADO PRIMÁRIO DO TRANSF. DE POT. -
  TRANSFORMER TC1A          TC1C
  1TC1SC NEUT0
  2CH1C TPRC
C
C IMPEDÂNCIA no secundário do TC do lado PRIMÁRIO do transf. pot.
  TC1SA STC1A          3.00
  TC1SB STC1B          3.00
  TC1SC STC1C          3.00
C final da descrição do TC lado primário do transf. pot.
C
C Dados referentes ao TC2 - TC do lado de baixa tensao
C
  TRANSFORMER          2.8E-32.6E-2TC2A
C <++++++> Cards punched by support routine on 05-Apr-05 16.21.41 <++++++>
C SATURATION
C C fr      vbase      sbase          tipo out
C 60.0      1.00E-031.00E-06
C C 345678901234567890123456789012345678901234567890
C C      Irms(pu)          Vrms(pu)
C 0.20000000000E-02          7.00
C 4.00000000000E-03          20.00
C 6.00000000000E-03          35.00
C 7.00000000000E-03          43.00
C 1.00000000000E-02          75.00
C 2.00000000000E-02          200.00
C 2.80000000000E-02          340.00
C 4.00000000000E-02          430.00
C 5.00000000000E-02          470.00
C 8.00000000000E-02          500.00
C 2.00000000000E-01          550.00
C      9999
  2.82842712E-03  2.62592259E-02
  5.25107738E-03  7.50263597E-02
  8.05200092E-03  1.31296129E-01
  9.37604273E-03  1.61306673E-01
  1.30507689E-02  2.81348849E-01
  2.69326991E-02  7.50263597E-01
  3.63934345E-02  1.27544811E+00
  6.23407710E-02  1.61306673E+00
  8.51843969E-02  1.76311945E+00
  1.78251034E-01  1.87565899E+00
  4.53547317E-01  2.06322489E+00
  9999
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C
  1TC2SA NEUT2          1.2 .001 2000.
  2NT1A TSECA          .0001 .1 5.
C
C segundo tranformador - FASE B DO TC LADO SECUNDÁRIO DO TRANSF. POT. -
  TRANSFORMER TC2A          TC2B
  1TC2SB NEUT2
  2NT1B TSECB
C
C terceiro transformador - FASE C DO TC LADO SECUNDÁRIO DO TRANSF. POT. -
  TRANSFORMER TC2A          TC2C
  1TC2SC NEUT2
  2NT1C TSECC
C
C IMPEDANCIA no secundário do TC do lado SECUNDÁRIO do transf. pot.
  TC2SA STC2A          3.00
  TC2SB STC2B          3.00
  TC2SC STC2C          3.00

```

C final da descrição do TC lado secundário do transf. pot.

C

BLANK card terminating network

C dados referentes as chaves do sistema elétrico

G1A	CH1A	-1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
G1B	CH1B	-1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
G1C	CH1C	-1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
NT1A	CH2A	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
NT1B	CH2B	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
NT1C	CH2C	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
LDA	CHGA	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
LDB	CHGB	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
LDC	CHGC	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0

C Chaves referentes a ligação dos taps do transformador a terra

C Ligação TRIANGULO

N10TA		1.000E+02	1.000E+02	0.000E+00		0
N50TA		1.010E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
N80TA		1.010E+00	1.000E+02	0.000E+00		0

C Chave referente a ligação entre as fases do enrolamento TRIANGULO

C N50TA	N50TB	1.010E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
---------	-------	-----------	-----------	-----------	--	---

C Chaves referentes a falta entre Trafo e TC2

TSECA	RFTTCA	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
TSECB	RFTTCB	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
TSECC	RFTTCC	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0

C Chaves referentes a falta externa próxima ao transformador de potência

CH2A	RFPXTA	1.000E+02	1.000E+02	0.000E+00		0
CH2B	RFPXTB	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
CH2C	RFPXTC	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0

C Chaves referentes a falta na linha de distribuição

LDA	RFLDA	1.00E+02	1.000E+02	0.000E+00		0
LDB	RFLDB	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
LDC	RFLDC	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0

C Chaves referentes a condição de rejeição de carga

CHGA	CHRJA	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
CHGB	CHRJB	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0
CHGC	CHRJC	1.00E+00	1.000E+02	0.000E+00		0

C Saída dos TCs

STC1A					MEASURING	1
STC1B					MEASURING	1
STC1C					MEASURING	1
STC2A					MEASURING	1
STC2B					MEASURING	1
STC2C					MEASURING	1

C CHAVE DE MEDIDA DO NEUTRO TRAF0 PRINCIPAL

NEUT1	NN1				MEASURING	1
-------	-----	--	--	--	-----------	---

BLANK card terminating switches

C dados referentes ao gerador

14FONTA	0	112.7E+03	6.000E+01	0.000E+01	0	-1.000E+00	1.000E+02
14FONTB	0	112.7E+03	6.000E+01	-1.200E+02	0	-1.000E+00	1.000E+02
14FONTC	0	112.7E+03	6.000E+01	1.200E+02	0	-1.000E+00	1.000E+02

BLANK card terminating sources

C CH1A CH1B CH1C NT1A NT1B NT1C

BLANK card terminating outputs

BLANK card terminating plots

BEGIN NEW DATA CASE