

**unesp**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

Campus de Ilha Solteira

**PAULO HENRIQUE GONÇALVES LEONEL DA SILVA**

**PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES USANDO A TRANSFORMADA  
WAVELET**

Ilha Solteira - SP  
2014

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**“Proteção Diferencial de Transformadores Usando a Transformada  
Wavelet”**

**PAULO HENRIQUE GONÇALVES LEONEL DA SILVA**

**Orientador:** Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia –  
UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586p Silva, Paulo Henrique Gonçalves Leonel da .  
Proteção diferencial de transformadores usando a transformada wavelet /  
Paulo Henrique Gonçalves Leonel da Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014  
73 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2014

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani  
Inclui bibliografia

1. Transformadores de potência. 2. Relé diferencial percentual.  
3. Transformada wavelet discreta.

# FOLHA DE APROVAÇÃO



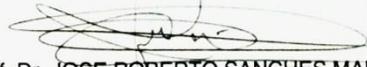
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

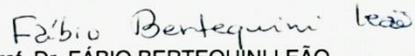
## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

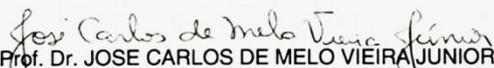
**TÍTULO:** Proteção Diferencial de Transformadores Usando a Transformada Wavelet

**AUTOR:** PAULO HENRIQUE GONÇALVES LEONEL DA SILVA  
**ORIENTADOR:** Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,  
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. FÁBIO BERTEQUINI LEÃO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. JOSE CARLOS DE MELO VIEIRA JUNIOR  
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Escola de Engenharia de São Carlos-  
Usp

Data da realização: 29 de agosto de 2014.

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço primeiramente a Deus, pela minha saúde, por ser meu guia espiritual e fonte de minhas forças.*

*Agradeço aos meus pais e familiares pelo incondicional apoio e dedicação em todas as etapas da minha vida.*

*Agradeço ao prof.Dr. José Roberto Sanches Mantovani pela atenção, incentivos e ensinamentos durante todo o desenvolvimento do trabalho.*

*Agradeço aos amigos e colegas do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LaPSEE, pelas trocas de experiências profissionais e de vida.*

*Agradeço ao apoio financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).*

## RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um algoritmo numérico de proteção diferencial de transformadores de potência. Neste algoritmo tem-se como principal objetivo a busca por uma eficiente discriminação entre correntes de faltas e correntes de magnetização, também conhecidas como correntes de *inrush*, que podem provocar a atuação indevida do relé diferencial. A transformada *wavelet* é utilizada para discriminar correntes de faltas de correntes de *inrush* utilizando o princípio de conservação de energia presente na análise multirresolução para esse tipo de transformada. O algoritmo numérico foi desenvolvido no MATLAB e a simulação do circuito elétrico usado como teste é realizada em software ATP/EMTP pela sua já consolidada utilização e confiabilidade de resultados quando se dispõe de dados técnicos reais de sistemas elétricos de potência. As simulações e resultados apresentados indicam que a técnica desenvolvida mostra-se eficiente de acordo com os comportamentos esperados de relés de proteção típicos.

**Palavras-chave:** Transformada wavelet discreta. ATP/EMTP. Transformadores de potência. MATLAB. Relé diferencial percentual.

## ABSTRACT

In this work it is presented a numerical algorithm for transformer differential protection. The principal objective of this algorithm is the search of an efficient distinction between fault currents and magnetization currents, also known by inrush currents that can induce false tripping of differential relays. The wavelet transform is used to discern fault currents from inrush currents, using the energy conservation principle that is available in this kind of transform. The numerical algorithm was developed in the software MATLAB and the electric circuit, used as a test, is simulated in software ATP/EMTP due to its already consolidated use and reliability of results when real technical data from power electric systems are available. The presented simulations and results indicates that the developed technique is shown efficient according to typical protection relay behaviours.

**Keywords:** Discrete wavelet transform. ATP/EMTP. Power transformer. MATLAB.

Percentage differential relay.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Ligações Trifásicas entre Transformadores : (a) Ligação $Y-\Delta$ (b) Ligação $\Delta-Y$ (c) Ligação $\Delta-\Delta$ (d) Ligação $Y-Y$ .	15
<b>Figura 2</b> - Fundamentos da Proteção Diferencial Percentual.	20
<b>Figura 3</b> - Proteção de Transformadores de Dois Enrolamentos.	21
<b>Figura 4</b> - Formas de Onda de Tensão e Fluxo Magnético Estacionário.	23
<b>Figura 5</b> - Relações entre a Curva de Saturação e a Magnitude da Corrente de <i>Inrush</i>	24
<b>Figura 6</b> - Corrente de Magnetização e Fluxo Magnético.	25
<b>Figura 7</b> - Sinal (a) de Tempo Contínuo e sua Representação (b) por um Conjunto de Sequências.	29
<b>Figura 8</b> - Formas de Onda (a) Sinal Senoidal (b) Sinal <i>Wavelet</i> .	32
<b>Figura 9</b> - Particularidades das Técnicas (a) Análise Fourier e (b) Análise <i>Wavelet</i> .	32
<b>Figura 10</b> - Escalonamento para uma Função Senoidal e para uma <i>Wavelet</i> .	33
<b>Figura 11</b> - Propriedade (a) Função <i>Wavelet</i> $\psi(t)$ e (b) Translação da Função <i>Wavelet</i> $\psi(t-b)$ .	34
<b>Figura 12</b> - Decomposição Multi-Nível de um Sinal.	37
<b>Figura 13</b> - A Decomposição do Sinal <i>Wavelet</i> .	38
<b>Figura 14</b> - A Reconstrução ou Síntese do sinal <i>Wavelet</i> .	39
<b>Figura 15</b> - Conceito de Detecção de Distúrbio em um Sinal Utilizando a Transformada <i>Wavelet</i> .	40
<b>Figura 16</b> - Circuito Equivalente - Transformador Monofásico com N Enrolamentos - ATP/EMTP.	44
<b>Figura 17</b> - Correntes Através dos TCs – Condições para Faltas Externas.	46
<b>Figura 18</b> - Correntes Através dos TCs – Condições para Faltas Internas.	47
<b>Figura 19</b> - Curvas de Saturação Características dos TCs de Medição.	48
<b>Figura 20</b> - Característica Operacional do Relé Diferencial Percentual.	50
<b>Figura 21</b> - Característica Operacional do Relé Diferencial Percentual.	51
<b>Figura 22</b> - Comparativo de Resposta á Corrente Diferencial – Relé Diferencial Percentual e Relé de Sobrecorrente.	52
<b>Figura 23</b> - Diagrama de blocos - Componentes do Relé Numérico.	53
<b>Figura 24</b> - Algoritmo Numérico de Proteção Diferencial Proposto.	56
<b>Figura 25</b> - Sistema Elétrico Simulado – Transformador 35 MVA.	58
<b>Figura 26</b> -Correntes Diferenciais de Magnetização nas Três Fases do Transformador	59
<b>Figura 27</b> - Correntes Diferencias com Aplicação da Carga no Transformador.	59
<b>Figura 28</b> - Simulação de Falta Fase-Terra e Sinal de Operação do Relé Diferencial.	60
<b>Figura 29</b> - Simulação de Falta Fase-Terra e Sinal de Operação do Relé Diferencial ( <i>Tripping</i> ).	60
<b>Figura 30</b> - Sistema Elétrico Simulado – Transformador 420 MVA.	64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Análise Harmônica – Corrente de Magnetização.	27
<b>Tabela 2</b> - Eficiência do Algoritmo ( <i>Proteção atuando</i> ). <i>Carregamento Leve: 4MVA</i>	62
<b>Tabela 3</b> - Eficiência do algoritmo ( <i>Proteção não atuando</i> ). <i>Carregamento Leve: 4MVA</i>	62
<b>Tabela 4</b> - Eficiência do Algoritmo ( <i>Proteção atuando</i> ). <i>Carregamento Pesado: 20MVA</i>	63
<b>Tabela 5</b> - Eficiência do algoritmo ( <i>Proteção não atuando</i> ). <i>Carregamento Pesado: 20MVA.</i>	63

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>09</b>
1.1 Estado da arte	10
1.2 Estrutura do texto	12
<b>2 TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA</b>	<b>13</b>
2.1 Conceitos gerais de transformadores de potência	14
2.2 Tipos de faltas em transformadores de potência	16
2.3 Proteção diferencial de transformadores de potência	19
<b>2.3.1 A corrente de magnetização na proteção de transformadores</b>	<b>22</b>
<b>2.3.2 Componentes harmônicas da corrente de magnetização</b>	<b>26</b>
<b>2.3.3 Transformadores de corrente (TCs)</b>	<b>27</b>
<b>3 A TRANSFORMADA WAVELET</b>	<b>28</b>
3.1 A transformada wavelet – conceitos gerais e filosóficos	29
3.2 A transformada wavelet – definições e propriedades	31
<b>4 A PROPOSTA DE TRABALHO</b>	<b>42</b>
4.1 Metodologia	42
<b>4.1.1 Os componentes do sistema elétrico de potência</b>	<b>42</b>
<b>4.1.2 Transformadores de corrente (TCs) aplicados á proteção diferencial</b>	<b>46</b>
4.2 Aquisição e tratamento de sinais	49
4.3 O algoritmo proposto	54
<b>5 TESTES E RESULTADOS</b>	<b>57</b>
<b>6 CONCLUSÕES</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O transformador de potência é um dos principais equipamentos encontrados em um sistema elétrico de potência (SEP), que desde sua concepção permitiu uma grande evolução no planejamento e operação dos sistemas de energia elétrica por possibilitar diversas aplicações em projetos e modelos construtivos de SEP, sendo assim um equipamento muito versátil e de ampla utilização. Os estudos envolvendo os transformadores de potência são direcionados às melhorias dos projetos, condições de operação, eficiência e vida útil desses equipamentos na indústria de energia elétrica o que também passa pelo seu sistema de proteção. A proteção adequada de um transformador de potência deve detectar um problema antes mesmo que ele se torne maior e capaz de danificar o funcionamento ou mesmo a estrutura física dessa máquina elétrica.

Na energização de um transformador a corrente de magnetização existe como efeito natural da necessidade de se estabilizar o campo magnético do transformador. Esta corrente, também conhecida como corrente de *inrush*, tem característica transitória e não deve ser confundida ou mal entendida pelo sistema de proteção do transformador como uma falta ou problema com o equipamento. De fato, pela dinamicidade da rede de energia elétrica, o transformador é energizado e desenergizado periodicamente e durante uma reenergização é possível que exista um fluxo magnético residual no núcleo do transformador e nesses casos a corrente de *inrush* pode atingir valores altos provocando então o acionamento de relés e outros equipamentos de proteção de forma inesperada e não desejada.

Para transformadores trifásicos, cada fase tem a sua própria corrente de magnetização, pois o ponto em que a tensão é aplicada permite que ocorra a energização do transformador em diferentes instantes. Não existem evidências diretas de que a energização de um transformador possa causar uma falha imediata no sistema elétrico devido aos altos níveis de corrente de *inrush*. Entretanto, falhas isoladas em transformadores de potência que são frequentemente energizados em condições de secundário sem carga podem provocar suspeitas dos efeitos perigosos desse fenômeno.

A transformada *wavelet* representa uma evolução da transformada de Fourier por ser capaz de apresentar informações do sinal analisado, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, ao contrário da análise Fourier que somente dispõe de análise no domínio da frequência. Desta forma a análise através da transformada *wavelet* possibilita determinar não somente a frequência existente no sinal, mas também o instante de tempo em que tal frequência é observada. Neste trabalho, a transformada *wavelet* discreta (TWD) é a principal ferramenta utilizada para detectar correntes de faltas e magnetização em transformadores de potência. Utiliza-se o princípio de conservação de energia, presente nesse tipo de transformada com o objetivo de observar e identificar a qual tipo de esforço o transformador está sendo submetido, baseado nos níveis de energia existentes nas componentes de detalhe *wavelet* de cada tipo de evento, seja falta ou apenas a magnetização do transformador.

Neste trabalho é proposto um relé numérico para a proteção diferencial de transformadores de potência que utiliza a transformada *wavelet* para distinguir as correntes transitórias de magnetização das correntes de faltas internas no equipamento.

A análise do transformador de potência é efetuada com base nos resultados de simulações do circuito elétrico de potência no *software* ATP/EMTP, que é um *software* muito utilizado quando se dispõe de dados técnicos reais de equipamentos e sistemas de energia elétrica. No ATP estão disponíveis para simulações os modelos e características dos equipamentos e máquinas elétricas utilizadas nos sistemas elétricos em geral, tais como geradores, transformadores, linhas de transmissão e tipos de cargas. O algoritmo de proteção diferencial do transformador, o tratamento de sinais do circuito elétrico e o projeto de proteção diferencial são implementados no *software* MATLAB. São apresentados os resultados de testes utilizando o *software* ATP/EMTP para simular a energização e faltas em sistema elétrico com um transformador de potência. As faltas no transformador de potência são definidas através das posições das chaves no circuito elétrico, que auxiliam nas simulações, onde dependendo da posição das chaves (aberta/fechada) pode-se simular os diferentes tipos de faltas, energização do transformador e aplicação de carga.

## 1.1 Estado da arte

Na literatura encontram-se diversos trabalhos que abordam o desenvolvimento de relés numéricos de proteção diferencial e técnicas para proteção de transformadores de potência.

Ngaopitakkul e Kunakorn (2006) realizam o estudo de classificação de faltas internas em transformadores trifásicos de dois enrolamentos, utilizando a combinação entre a transformada *wavelet* discreta (TWD) e redes neurais artificiais. As condições de faltas do transformador são simuladas utilizando o *software* ATP/EMTP bem como as formas de onda de correntes são extraídas nas diversas escalas da transformada *wavelet*. Os treinamentos das redes, utilizando a técnica *back propagation algorithm* e os diagnósticos de faltas são realizados utilizando o *software* MATLAB/*simulink*. Os autores modificam o modelo do transformador trifásico no ATP/EMTP de forma que seja possível simular as condições de faltas internas nos equipamentos. Vários casos e tipos de faltas internas são simulados para verificar a validade do algoritmo, para propor o desenvolvimento de relés digitais. Os tipos de faltas analisados foram de enrolamentos de fase para terra e entre enrolamentos, ambos os casos estudados para os lados primário e secundário do transformador. Através deste procedimento é possível determinar em qual das três fases ocorre a falta e pela realização de várias simulações chega-se a conclusão que apenas a escala um da transformada *wavelet* é suficiente para determinar faltas internas nos enrolamentos do transformador, fazendo com que os coeficientes de escala mais alta fossem desnecessários a princípio.

Oliveira (2009) propõe a utilização da transformada *wavelet* para a análise de correntes trifásicas

diferenciais em transformadores quando da ocorrência de um distúrbio transitório como uma corrente de magnetização ou de casos onde ocorre uma falta interna ou externa ao transformador, analisando o comportamento dos coeficientes de detalhe da transformada *wavelet* discreta. O autor realiza uma detalhada explicação de como os modelos das máquinas e equipamentos elétricos foram desenvolvidos para uma posterior simulação no software ATP/EMTP. É desenvolvida uma interface gráfica em MATLAB para facilitar as análises dos casos estudados que contêm três blocos principais, o bloco de seleção do distúrbio, seleção de características da análise *wavelet* e visualização da análise feita pelo algoritmo de proteção. A interface gráfica possibilita apenas uma opção de configuração do sistema elétrico e de conexões do transformador de potência. Analisa-se também o comportamento do algoritmo de proteção quando da variação de características como resistência de falta interna e externa, carga conectada na linha de transmissão e *wavelet* mãe utilizada na análise do sinal.

Eldin e Refaey (2011) propõem um algoritmo baseado na transformada *wavelet* discreta para a discriminação entre corrente de *inrush* e faltas internas em transformadores de potência trifásicos com três enrolamentos. Neste trabalho são analisados o terceiro e quarto níveis de detalhes da transformada *wavelet*, onde é proposto o cálculo do desvio médio absoluto para cada amostra destes níveis de detalhes, que foram chamados MAD (*Median Absolute Deviation*). Por fim, analisam-se as formas de onda das razões entre os desvios médios do detalhe 4 em relação ao detalhe 3 buscando particularidades que permitam determinar se o transformador está sendo energizado ou sob faltas.

Zendejdel e Sanaye-Pasand (2011) propõem dois índices baseados na transformada *wavelet* discreta para projetar um esquema de proteção diferencial de transformadores trifásicos. Tais índices são utilizados em conjunto com o algoritmo de proteção proposto para introduzir novas metodologias de projeto. O primeiro índice é baseado na caracterização do distúrbio observando os coeficientes de detalhe do sinal de corrente e a distribuição da sua energia no domínio da frequência, sendo então realizada a análise gráfica. O segundo índice é baseado no número de zeros das correntes de *inrush* comparados com o mesmo índice nas correntes de falta quando se tem a decomposição do sinal de corrente nos níveis da transformada *wavelet*, sendo esta uma análise gráfica. Os autores propõem a realização e repetição de testes para identificar quais são os melhores coeficientes para se trabalhar com esse tipo de metodologia como forma de referência para trabalhos futuros. Para os cálculos da energia do sinal os autores apresentam resultados das análises entre os detalhes *d1-d6* da transformada *wavelet* concluindo que *d1* não é adequado para esta metodologia pela grande presença de ruídos no sinal. Para os cálculos utilizando os números de zeros as restrições ficaram entre os coeficientes *d4-d6*, pois observa-se que esses coeficientes são diretamente dependentes da magnitude do sinal original, o que poderia restringir a técnica. Assim, os autores aconselham fazer a análise com os coeficientes *d2-d3* como proposta para projetos de proteção de transformadores trifásicos. Com esta informação e a combinação das duas técnicas, os autores apresentaram uma técnica com um índice ótimo de

acertos na detecção de correntes de magnetização e de correntes de falta interna em transformadores trifásicos.

Pothisarn et al. (2012) propõem uma técnica para detectar e identificar faltas internas em transformadores trifásicos com dois enrolamentos realizando a análise dos coeficientes de alta frequência (componentes de detalhe) obtidos pela transformada *wavelet* discreta, realizando comparações entre os resultados obtidos com a utilização de cada componente a partir de uma *wavelet* mãe Daubechies4 (db4). O algoritmo proposto é utilizado para diferenciar entre curto-circuito externo e faltas internas nos enrolamentos do transformador apresentando uma eficiência maior que 87% na detecção de falhas no sistema de forma correta.

Bejmert et.al. (2014) apresentam um algoritmo que emprega a lógica *fuzzy* como técnica principal que auxilia um algoritmo de proteção baseado em multi-critérios com o objetivo de uma melhor eficiência na detecção das correntes de *inrush*. O algoritmo de proteção desenvolvido é testado em *software* ATP-EMTP, a partir de sinais gerados no próprio *software* e dados reais do sistema elétrico e se mostra um algoritmo eficiente e mais sensível que outros já conhecidos, que se baseiam em critérios tradicionais e configurações até então amplamente utilizadas. Aqui se aplica uma base de regras que fazem parte da técnica de lógica *fuzzy* e os autores buscam três objetivos principais para o algoritmo de proteção desenvolvido que são a independência do algoritmo dos níveis de segunda harmônica bem como das características muitas vezes imprevisíveis da corrente de *inrush*, manter o desempenho computacional do algoritmo mesmo quando ocorre a saturação dos transformadores de corrente e a maior sensibilidade para com as faltas internas, mesmo que tais correntes de falta apresentem magnitudes muito pequenas.

## 1.2 Estrutura do texto

A seguir apresenta-se a estrutura do texto desta dissertação, apresentando uma visão geral e informações relevantes a respeito de cada capítulo do trabalho.

No capítulo II são apresentados conceitos diversos a respeito de transformadores de potência e os tipos de falta a que tais equipamentos podem estar sujeitos, bem como as causas desses tipos de faltas ou distúrbios apresentados de forma mais detalhada sejam eles transitórios ou permanentes e seus efeitos sobre o transformador e também sobre o sistema de energia elétrica como um todo. O capítulo é finalizado com a apresentação das técnicas de proteção diferencial de transformadores, suas particularidades e processo de evolução ao longo dos anos.

No capítulo III é apresentada a transformada *wavelet*, uma das principais ferramentas utilizadas para a elaboração desse trabalho. Através de demonstrações que passam pela sua origem, conceitos gerais e filosóficos bem como características próprias que tornam possível ajudar a justificar sua utilização cada vez

maior em estudos que envolvem processamento digital de sinais e aplicações em diversas áreas do conhecimento. A aplicação da transformada *wavelet* na proteção de transformadores também é um item de destaque neste capítulo, pois mostra conceitos diversos como *wavelet* mãe, análise multirresolução, coeficientes *wavelet*, e princípio de conservação de energia que foram utilizados na elaboração desse trabalho.

O capítulo IV é iniciado com a metodologia utilizada e todas as escolhas de conceitos e técnicas já definidas e conhecidas dos capítulos anteriores para o desenvolvimento de um algoritmo de relé numérico para proteção de transformadores de potência utilizando uma combinação do relé diferencial percentual com a transformada *wavelet*. São detalhados a aquisição e tratamento dos sinais do circuito elétrico, onde é apresentado o sistema elétrico de potência utilizado para testes, com todos os seus elementos, com destaque para o transformador de potência e como foi realizada sua modelagem em *software* apropriado. A aplicação da transformada *wavelet*, dentro da metodologia de proteção diferencial proposta é uma seção muito importante nesse capítulo, pois apresenta o algoritmo desenvolvido e implementado, com todas as suas particularidades.

No capítulo V apresentam-se os testes e resultados para as simulações de energização do transformador e aplicação de faltas com o objetivo de analisar o comportamento do relé diferencial digital projetado para diferenciar entre as correntes de magnetização (*Inrush*) e correntes de falta no transformador de potência. São fixados gráficos e tabelas para que seja possível a apresentação do comportamento do sistema de proteção proposto além das apresentações de informações sobre a rapidez e eficiência do algoritmo.

O capítulo VI estão as principais conclusões do trabalho.

## **2 TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

No século XIX ocorreu o surgimento das primeiras linhas de transmissão de energia, que inicialmente, tinham sua função destinada apenas a suprir sistemas de iluminação que operavam em baixa tensão e em corrente contínua (CC). O início da utilização dos transformadores foi importante para a mudança nas características desses sistemas porque a partir de então foi possível a transmissão de energia elétrica a maiores distâncias em níveis de tensões mais elevados bem como a redução das perdas durante o processo. No mercado de máquinas elétricas surgem geradores e motores de corrente alternada (CA), mais baratos e de construção mais simples que os de corrente contínua. Desta forma, o sistema trifásico se torna padrão para a geração por proporcionar custos reduzidos na transmissão como também na distribuição de energia elétrica. Nas cargas ainda existe a possibilidade de configurações trifásicas ou monofásicas, onde as trifásicas são geralmente equilibradas, ou seja, constituídas por impedâncias iguais (FUCHS,1979).

No estudo de máquinas elétricas o transformador sempre recebeu posição de destaque entre os elementos mais importantes em qualquer sistema de energia elétrica, mais especificamente, sistemas elétricos de potência CA. Transformadores são equipamentos versáteis, pois permitem a transferência de energia elétrica de forma mais econômica, além de outras utilidades em circuitos de baixa potência, circuitos eletrônicos, controle, tratamento de sinais e proteção de sistemas elétricos, permitindo a operação de dispositivos em tensão mais adequada dependendo das atividades realizadas.

## 2.1 Conceitos gerais de transformadores de potência

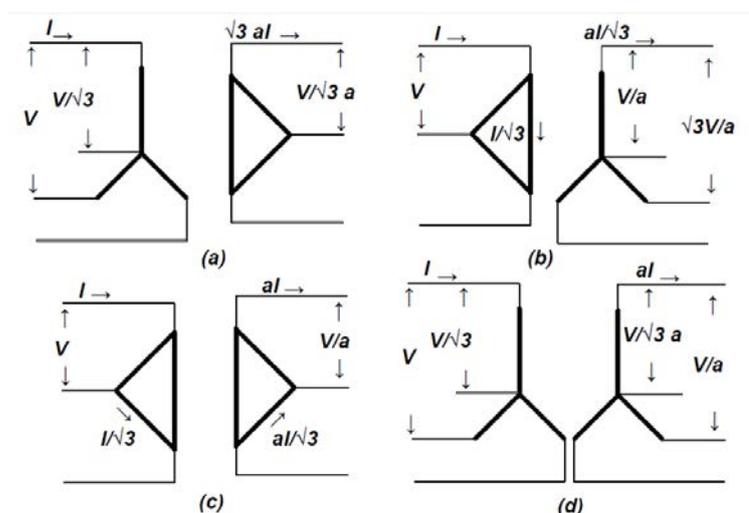
Nesta seção serão introduzidas diversas informações que definem e explicam o funcionamento do transformador de potência, a fim de que seja possível consolidar alguns conceitos importantes que serão expostos durante todo o trabalho. Serão demonstrados conceitos gerais sobre a concepção, modelos construtivos e aplicações da máquina elétrica bem como expostos diversos princípios físicos que envolvem o funcionamento do transformador.

O transformador, do ponto de vista construtivo, consiste em dois ou mais enrolamentos, acoplados magneticamente através de um fluxo magnético ( $\phi$ ) comum entre eles. Ao se conectar uma fonte de alimentação de corrente alternada em um desses enrolamentos, que pode ser definido como a entrada ou enrolamento primário, é produzido um fluxo magnético alternado, cuja amplitude dependerá do nível de tensão aplicado pela fonte, da frequência da tensão dessa fonte de alimentação além do número de espiras pertencentes aos enrolamentos. Como o fluxo magnético é comum aos enrolamentos do transformador, é estabelecido um enlace de fluxo com o outro enrolamento disponível, definido como saída ou enrolamento secundário. Assim, com a presença de fluxo magnético no secundário, tem-se a presença de uma tensão induzida, que depende do número de espiras no secundário, da magnitude do fluxo comum bem como da frequência.

É possível que três transformadores monofásicos sejam conectados para formar um banco trifásico de transformadores monofásicos com algumas configurações que apresentam características próprias. A configuração Y- $\Delta$  (Y-Delta), com o neutro aterrado, é utilizada comumente para se partir de uma tensão elevada para uma tensão média ou baixa. A razão para este tipo de ligação é que assim pode-se dispor de um neutro para aterramento no lado de alta tensão, um procedimento que pode se mostrar desejável em muitos casos. A ligação  $\Delta$ -Y é usada comumente para se obter no secundário uma tensão mais elevada. Quando se utilizam bancos trifásicos de transformadores monofásicos a ligação  $\Delta$ - $\Delta$  há a vantagem de que um transformador no primário ou secundário pode ser removido para conserto ou manutenção enquanto os outros dois continuam a funcionar como um banco trifásico, com o valor nominal reduzido a 58% do valor do banco original. Esta configuração é conhecida como ligação V ou delta aberto. A ligação Y-Y é

raramente usada devido a dificuldades oriundas de fenômenos associados à corrente de excitação dos transformadores porque, já que essa configuração não apresenta conexão de neutro para conduzir as harmônicas da corrente de excitação, tensões harmônicas são produzidas distorcendo de modo significativo as tensões do transformador (FITZGERALD ; ARTHUR, 2006). Na Figura 1 são ilustrados os principais esquemas de ligação para os enrolamentos de transformadores trifásicos bem como as relações de corrente e tensão nos lados primário e secundário do transformador de acordo com cada tipo de ligação apresentada.

Figura 1 - Ligações Trifásicas entre Transformadores : (a) Ligação Y- $\Delta$  (b) Ligação  $\Delta$ -Y  
(c) Ligação  $\Delta$ - $\Delta$  (d) Ligação Y-Y.



Fonte: Adaptado de Fitzgerald e Arthur (2006).

De fato é muito mais comum utilizar no lugar de um banco com três transformadores monofásicos, apenas um transformador trifásico onde todos os seis enrolamentos necessários estão em um único núcleo e tanque.

Os transformadores com três ou mais enrolamentos são usados para interconectar três ou mais circuitos que podem apresentar tensões diferentes e para tais topologias esses tipos de transformadores custam menos, sendo mais eficiente usar apenas um transformador com múltiplos enrolamentos a utilizar um número equivalente de transformadores de dois enrolamentos. Existem aplicações frequentes em eletrônica onde existem transformadores com um único primário e múltiplos secundários. Em outro exemplo, um sistema de distribuição pode ser alimentado por um banco trifásico de transformadores de múltiplos enrolamentos, utilizando dois ou mais sistemas de tensão diferente. Algumas vezes, utilizam-se enrolamentos terciários conectados com a finalidade de fornecer um caminho de baixa impedância para as componentes de terceira harmônica da corrente de excitação, reduzindo tais componentes da tensão do neutro na máquina elétrica.

Algumas das questões que surgem do uso de transformadores com múltiplos enrolamentos estão

associadas aos efeitos das impedâncias de dispersão sobre a regulação de tensão do conjunto, as correntes de curto-circuito bem como a divisão de cargas em cada um dos circuitos conectados. Nestes casos, o estudo dos circuitos equivalentes são muito importantes. O estudo dos circuitos equivalentes de transformadores de múltiplos enrolamentos é mais complicado com relação aos casos de apenas dois enrolamentos, pois levam em consideração as impedâncias de dispersão associadas a cada par de enrolamentos e a técnica mais comum para se apresentar os circuitos equivalentes é a de representar todas as grandezas através de uma base comum utilizando, por exemplo, o sistema por unidade (p.u.) ou usando relações de espiras adequadas para referir os enrolamentos. Nesses tipos de análises, muitas vezes não se considera a corrente de excitação (FITZGERALD ; ARTHUR, 2006).

## 2.2 Tipos de faltas em transformadores de potência

Nesta seção, apresentam-se os conceitos básicos de proteção de transformadores de potência, os principais tipos de faltas que afetam o funcionamento dessa máquina elétrica bem como a rede de distribuição de energia em geral.

A proposta de utilização de equipamentos de proteção é a de minimizar os efeitos de faltas em sistemas elétricos de potência, que nem sempre podem ser evitadas. Neste contexto, um sistema elétrico de potência é considerado como toda a planta necessária para gerar, transmitir e distribuir energia elétrica, como por exemplo, geradores, transformadores de potência, linhas e cabos, disjuntores, transformadores de instrumentação etc. As faltas que ocorrem podem ser resultantes de influências externas ou internas. A engenharia de proteção é uma parte muito importante de qualquer planta de um sistema elétrico com significativa importância para a operação do sistema. Como os danos causados por uma falta dependem diretamente da sua duração é necessário que equipamentos de proteção operem o mais rapidamente possível e de forma seletiva, ou seja, com a proposta de isolar apenas o equipamento que está em risco (UNGRAD, 1995).

Por ser um dos equipamentos mais importantes dos sistemas de energia elétrica, o transformador e sua proteção recebem muita atenção e novas técnicas e propostas sempre surgem para manter este equipamento seguro contra eventos que podem reduzir sua vida útil ou mesmo causar sua inutilização parcial ou total. Então para que exista um bom projeto de proteção do transformador é necessário saber quais tipos de problemas ou distúrbios o transformador está sujeito, baseados nas suas características de funcionamento, posição nas redes elétricas, cargas a ele conectadas, características construtivas etc.

Os tipos de faltas em transformadores de potência podem ser divididos em dois grandes grupos, o que compõe as faltas externas e outro com as faltas internas. Alguns exemplos de *faltas externas* que podem afetar o transformador são detalhados a seguir.

A **sobretensão** em sistemas elétricos de potência trifásicos é resultado que nesses sistemas as tensões fase-fase e fase-neutro nas cargas são influenciadas pela queda de tensão ao longo da linha bem como as características próprias das cargas, mas apesar disso, esses valores de tensão só podem variar dentro de certos limites. Quando os níveis de tensão ultrapassam essa faixa limite ficando muito acima ou muito abaixo desses valores então se tem uma condição anormal de operação do sistema. A sobretensão ocorre quando os níveis de tensão ficam acima dos permitidos. Agências reguladoras definem essas faixas de operação. Muitas vezes uma perda repentina de carga em uma região do sistema, devido às condições de operação de emergência podem fazer a tensão ser elevada e afetar o transformador. Defeitos em reguladores de tensão de geradores e transformadores ou mesmo problemas com fator de potência também causam aumento nos níveis de tensão. As consequências para o transformador são um grande estresse na isolação dos enrolamentos, aumento das perdas no ferro e aumento significativo na corrente de excitação e aquecimentos.

As **sobrecargas** ocorrem quando o sistema elétrico se torna termicamente sobrecarregado pela ultrapassagem do limite permitido da corrente na carga, geralmente, por um longo período de duração ou por uma redução na eficiência de dissipação de calor nos equipamentos. As causas podem ser a má distribuição de cargas entre transformadores em paralelo ou desbalanceamento de carga em bancos trifásicos. O resultado é o aumento da temperatura dos componentes do transformador com o risco de danos permanentes ou perda de sua vida útil. Os efeitos de sobrecarga se desenvolvem lentamente porque a constante de tempo que define o sobreaquecimento é lenta.

A **subfrequência** também é um tipo de falta externa, pois também é causada por distúrbios no sistema elétrico, mais especificamente o desbalanceamento entre geração e carga e os efeitos são muito parecidos com os da sobrecarga. Transformadores podem passar por distúrbios como sobretensão e subfrequência e ainda assim manter sua operação, mas as duas condições sentidas ao mesmo tempo podem se tornar muito sérias. Neste caso tem-se como consequência um aumento significativo na corrente de excitação que ocorre mais acentuadamente em baixas frequências causando sobrefluxo no circuito magnético do transformador.

Os **curtos-circuitos externos** que são os tipos de faltas originadas de algum curto-circuito que ocorre fora da zona de proteção do transformador, mas geram um efeito de aumento da corrente no transformador e danos aos enrolamentos. Os danos mais sérios aos enrolamentos do transformador ocorrem durante o primeiro ciclo das correntes de falta externa. É muito difícil proteger o transformador de todos os tipos de estresses causados pelos curtos-circuitos externos, mas apesar disso diversos modelos e estratégias sempre são apresentadas em diversos estudos.

Transformadores de potência também sofrem com *faltas internas* que abrangem todo o grupo de faltas ou distúrbios que ocorrem dentro da zona de proteção do transformador. As faltas internas em

transformadores são divididas em duas classes para fins de discussão: *faltas incipientes e faltas ativas*. Faltas incipientes são faltas que se desenvolvem lentamente, mas podem se tornar maiores se suas causas não forem detectadas e corrigidas. Faltas ativas são as que requerem ações imediatas para limitar danos e prevenir ocorrências destrutivas adicionais (ANDERSON, 1999).

Começando pelas faltas internas incipientes tem-se o **sobreaquecimento** que ocorre principalmente por ligações internas precárias, seja do circuito elétrico ou circuito magnético. Ele resulta também da não eficiência da refrigeração do transformador por um sistema de ventilação com mau funcionamento. O **sobrefluxo** também é uma das causas de faltas internas em que a exposição do transformador a períodos longos de sobrefluxo pode causar a quebra da isolação do circuito magnético ou mesmo do circuito elétrico de forma gradual. O último tipo de falta incipiente é a **sobrepresão** que ocorre mais precisamente no tanque do transformador pela liberação de gases ou produtos causados por aquecimentos localizados ou alguns tipos de faltas, como por exemplo as faltas entre enrolamentos do transformador que podem se desenvolver de forma lenta causando sobrepresão pelos materiais liberados e acumulados gradualmente durante o processo.

O segundo tipo de faltas internas, são as faltas ativas que ocorrem rapidamente e necessitam de tomadas de decisão as mais breves possíveis para não danificarem o transformador. A primeira falta ativa apresentada é o **curto-circuito no enrolamento Y** para transformadores conectados em  $\Delta$ -Y. Esse tipo de falta é perigoso, pois a corrente de curto-circuito no lado Y do transformador é diferente da corrente de curto-circuito do lado  $\Delta$ . A magnitude da corrente de falta depende da resistência de aterramento do lado Y, bem como de qual ponto do enrolamento ocorre a falta. Os principais perigos estão no processo de detecção da falta, principalmente no caso de se tentar detectar uma falta no lado Y pelo lado  $\Delta$ , pois a corrente de falta tem uma magnitude muito pequena no lado  $\Delta$  do transformador. Como aparecem correntes muito baixas os dispositivos de proteção têm dificuldade de reconhecer quando estes tipos de faltas ocorrem. Essas informações alertam projetistas de sistemas de proteção a tomarem cuidado com esse tipo de ligação. No caso em que o transformador está operando na ligação  $\Delta$ -Y e tem-se uma carga somente no lado  $\Delta$  do transformador será ainda mais difícil uma detecção adequada da corrente de falta (ANDERSON, 1999).

O **curto-circuito no enrolamento A** apresenta mais dificuldade de ser detectado que no caso anterior. A magnitude mínima da corrente de curto-circuito ocorre quando uma falta incide exatamente na metade do enrolamento da fase com problemas e mesmo em casos extremos a corrente de falta não atinge valores tão acima das condições normais. Os **curtos-circuitos fase-fase** só existem para transformadores trifásicos e tem pouca probabilidade de ocorrer, mas quando ocorrem, apresentam correntes de grande magnitude, podendo ser comparadas às correntes de falta fase-terra. O **curto-circuito entre enrolamentos** não é tão comum em transformadores de baixa tensão, a não ser que os seus enrolamentos estejam muito danificados mecanicamente e com a isolação muito comprometida. Para transformadores de tensões mais elevadas os riscos de *flashovers* ou faiscamentos entre os enrolamentos são maiores e ocorrem, principalmente, nas

extremidades dos enrolamentos. O curto-circuito de apenas uma pequena porção de enrolamentos pode causar correntes de falta muito elevadas. Apesar das correntes de falta serem elevadas, as tensões terminais não aumentam muito em magnitude, necessitando um bom projeto de proteção para que os relés detectem adequadamente se está ocorrendo uma falta.

As faltas ativas podem ocorrer *no núcleo* do transformador, que construtivamente, é um conjunto de várias lâminas metálicas isoladas entre si. O objetivo de se ter o núcleo construído dessa forma é proporcionar um caminho adequado para o fluxo magnético do transformador e manter essa isolamento magnética do conjunto. Os problemas são os sobreaquecimentos e sobrefluxos que causam a deterioração dessa importante isolamento magnética. A ruptura dessa isolamento causa aumento significativo nas perdas no núcleo e aquecimentos em regiões localizadas. As correntes nos terminais do transformador não apresentam grande mudança de magnitude e então esse tipo de falta é difícil de ser detectado por relés conectados aos terminais. O mais comum, para esse tipo de falta, é utilizar relés sensíveis à emissão de gases, pois são mais eficientes nesses casos.

As *faltas no tanque* ocorrem em transformadores imersos em óleo onde o sistema de refrigeração passa pelo transporte de óleo pelo núcleo do transformador. Problemas nesse sistema de refrigeração, como o fluxo inadequado do óleo ou mesmo o impedimento desse fluxo causam aquecimentos perigosos e redução do isolamento dos componentes do transformador. O *faiscamento nas buchas* fecha a análise das faltas ativas. As buchas estão dentro da zona de proteção dos relés se os transformadores de corrente estão conectados externamente a essas buchas. Isso é importante, pois demonstra que mesmo algumas faltas que estejam em conexões externas ao transformador podem ser detectadas por diversos sistemas de proteção.

### 2.3 Proteção diferencial de transformadores de potência

Os riscos aos quais os transformadores estão expostos na rede elétrica são os mais diversos. Mesmo que algumas faltas tenham maior ou menor probabilidade de ocorrer, a classificação dos diversos tipos existentes é de extrema importância, como foi apresentado anteriormente, pois as estratégias para tratar esses distúrbios no sistema elétrico dependem de conhecer as suas características.

Os dispositivos de proteção contra faltas do tipo incipientes não requerem uma atuação rápida se comparada com a necessidade de uma detecção mais eficiente dos dispositivos de proteção contra faltas ativas já que as faltas do tipo incipientes são do tipo que se desenvolvem lentamente, como por exemplo, sob a forma de deterioração da isolamento de condutores e outros componentes da máquina elétrica, que pode se tornar perigosa o bastante para causar um problema maior ao funcionamento do transformador, mas de forma gradual, para então ser capaz de sensibilizar algum dispositivo de proteção específico.

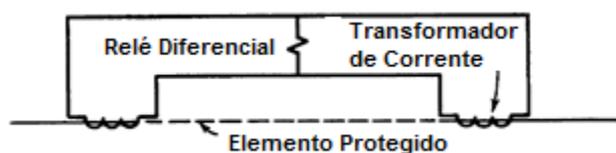
É comum a utilização de sistemas de proteção auxiliares para as faltas do tipo incipientes. Para as

faltas ativas, o comportamento do sistema de proteção deve ser totalmente diferente. Faltas ativas se desenvolvem rapidamente e assim o sistema de proteção também deve se comportar, promovendo a isolamento rápida do transformador da rede elétrica e minimizar os danos ao sistema (ANDERSON, 1999).

A concepção da proteção diferencial para qualquer equipamento elétrico como gerador, transformador, linha de transmissão entre outros, segue o princípio básico de realizar a comparação de valores de grandezas elétricas de ambos os terminais do equipamento a fim de encontrar alterações no comportamento de variáveis, como a corrente por exemplo (COURY et.al., 2013).

A Figura 2 ilustra o princípio de funcionamento do relé diferencial percentual com uma apresentação básica do circuito de potência e do circuito de proteção. Transformadores de corrente (TCs) condicionam os níveis de correntes do circuito de potência onde está localizado o elemento ou máquina elétrica que se deseja proteger aos níveis que podem ser suportados e tratados pelo relé diferencial sem danos ao circuito de proteção.

Figura 2 - Fundamentos da Proteção Diferencial Percentual.

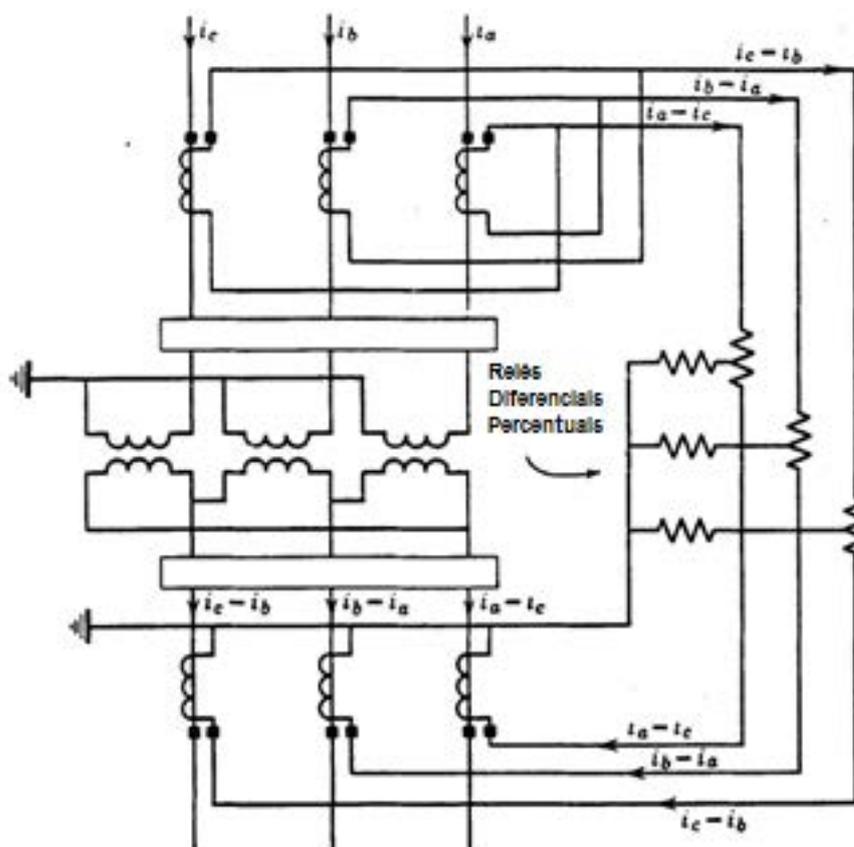


Fonte: Mason (1956).

O esquema de proteção diferencial convencional de um transformador é baseado no princípio de que a potência na entrada de um transformador, sob condições normais, é igual à potência em seu terminal de saída. Assim, para qualquer falta que ocorra dentro da zona monitorada pela proteção diferencial, esta condição não existe. Métodos conhecidos de proteção diferencial comparam as correntes no primário e no secundário do transformador de potência para monitorar se existe um desbalanceamento entre esses valores e liberar um sinal de operação para causar a atuação de chaves e disjuntores com o objetivo de desconectar o equipamento e protegê-lo de danos.

A Figura 3 apresenta o esquema geral de proteção de transformadores com dois enrolamentos, utilizando um transformador trifásico conectado em  $\Delta$ -Y. A técnica de proteção pode ser aplicada através de relés diferenciais posicionados de acordo com as conexões do transformador ao sistema, bem como de seus respectivos transformadores de correntes nos lados primário e secundário do transformador que compõem o circuito de medição. Na figura ainda são representados  $i_a, i_b, i_c$  como sendo as correntes para cada uma das três fases do circuito elétrico.

Figura 3 - Proteção de Transformadores de Dois Enrolamentos.



Fonte: Mason (1956).

O transformador de corrente e seu correto uso em sistemas de proteção envolve diversas discussões importantes de forma a não acarretar em erros de medição e tratamento dos sinais. Uma dessas discussões é a de como a conexão dos TCs será feita, em delta ou Y. Para as correntes de fase do transformador, sabe-se que na teoria a *soma vetorial* das três correntes trifásicas é zero. Em outras palavras, para as condições de faltas externas ou faltas à terra no lado delta do transformador não importa a forma que o TC será conectado. No lado delta do transformador não se observa a componente de sequência zero das correntes trifásicas. Ainda, se o transformador não tiver o neutro aterrado também se pode optar por qualquer uma das duas conexões para o TC. Já para as faltas no lado Y do transformador aconselha-se a ligação dos TCs em delta já que a oposição desses tipos de ligações permite a circulação das componentes de sequência zero da corrente trifásica pelo laço delta do TC garantindo que essas componentes serão mantidas longe de influenciar o funcionamento do relé diferencial. De fato, as ligações dos transformadores de corrente dessa forma são propostas com o objetivo de evitar a influência das correntes de sequência zero sobre o funcionamento do relé, mas todas as análises com as componentes de sequência positiva e negativa permanecem possíveis para faltas do tipo fase-terra ou entre fases no transformador de potência (MASON, 1956).

### 2.3.1 A corrente de magnetização na proteção de transformadores

O processo de funcionamento de um transformador apresenta características importantes que podem ser destacadas como fontes de diversas discussões sobre os comportamentos dos sistemas de proteção destinados a estas máquinas elétricas.

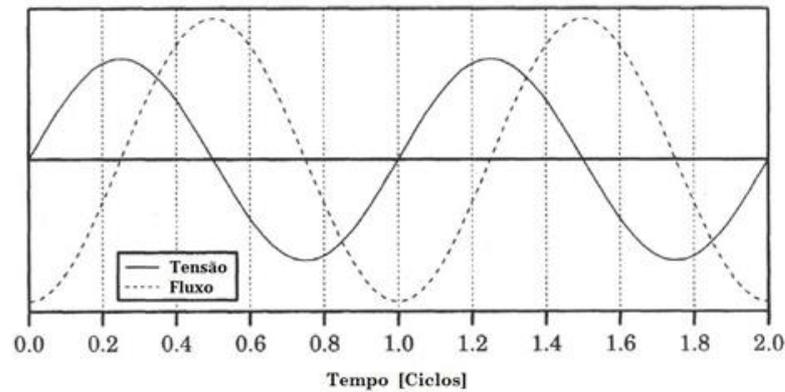
Quando um transformador é energizado a partir da aplicação de uma fonte de tensão no seu terminal primário tem-se uma corrente que é necessária para estabilizar o campo magnético do transformador. A aplicação ou retirada de cargas da máquina elétrica operando em regime permanente também aplica esforços sobre o transformador de potência e exige uma reenergização do conjunto. Tal corrente é chamada de corrente de excitação. Desconsiderando-se da corrente de excitação apenas a parcela que representa a *componente de perdas no núcleo* do transformador tudo o que resta é chamada de *corrente de magnetização* ou *corrente de inrush*. Essa corrente tem característica transitória e não deve ser entendida pelo sistema de proteção do transformador como uma falta ou problema com o equipamento (FITZGERALD ; ARTHUR, 2006).

Uma das principais preocupações acerca da corrente de *inrush* está na possibilidade dessa corrente atingir magnitudes mais altas e sensibilizar os dispositivos de proteção sendo confundida com uma corrente de falta. Correntes de magnetização podem chegar a valores de oito a dez vezes a corrente de trabalho do transformador em plena carga, dependendo das condições de energização do conjunto e de fluxos residuais durante a reenergização. Não existem evidências diretas de que a energização de um transformador possa causar uma falha imediata no sistema elétrico devido aos altos níveis de corrente de *inrush*. Entretanto, falhas isoladas em transformadores de potência que são frequentemente energizados em condições de secundário sem carga podem provocar suspeitas dos efeitos perigosos desse fenômeno (SOARES et al, 1995).

Existem alguns fatores que contribuem para caracterizar a magnitude e a duração da corrente de *inrush*. Entre os principais fatores destacam-se o tamanho do banco transformador, a robustez do sistema de energia elétrica, as características construtivas do transformador como o tipo e qualidade do material ferromagnético e a existência ou a quantidade de fluxo residual (ANDERSON, 1999).

Quando um transformador é inicialmente energizado, ou seja, a ele é aplicada uma tensão senoidal, então também se pode definir o fluxo magnético como a integral dessa tensão. Na Figura 4 é apresentado um exemplo da relação entre a tensão senoidal aplicada ao terminal primário do transformador e o fluxo magnético característico durante esse processo de energização do conjunto para que seja possível ilustrar como podem ser estudadas algumas características da corrente de *inrush* do transformador de potência. É observado que o fluxo está defasado da tensão em  $90^\circ$ .

Figura 4 – Formas de Onda de Tensão e Fluxo Magnético Estacionário.



Fonte: Anderson (1999).

Admitindo o transformador como sendo ideal para fins de demonstrações das propriedades, de acordo com a equação (1) tem-se o fluxo estacionário que nada mais é que a integral da tensão senoidal aplicada à máquina elétrica.

$$\varphi = \frac{1}{N} \int \sin \omega t dt = \frac{-1}{\omega N} \cos \omega t \quad (1)$$

Se as indutâncias dos enrolamentos do transformador fossem lineares, a corrente deveria apresentar a mesma forma de onda do fluxo magnético. Conforme o fluxo magnético se acumula, a corrente também aumenta, segundo a expressão a seguir.

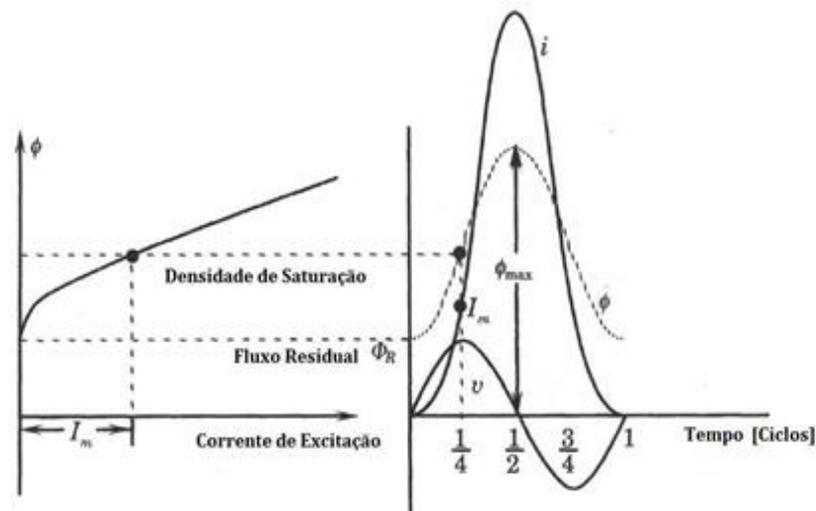
$$i = \frac{1}{L} \int v dt = \frac{-1}{\omega L} \cos \omega t \quad (2)$$

Como a indutância não é linear, então a operação do transformador sobre condições normais depende das características da sua curva de saturação. A saturação do transformador pode ser esperada já que o transformador é projetado para operar na região próxima do “joelho” de sua curva de saturação sob condições normais. Um fluxo mais alto que o normal pode causar a saturação do transformador e como consequência, correntes de magnetização muito elevadas. Na Figura 5 ilustram-se como as características da curva de saturação do transformador influenciam na magnitude da corrente de *inrush*. A curva de saturação à esquerda mostra a corrente de excitação necessária para desenvolver o respectivo nível de fluxo.

Para cada ponto da forma de onda de fluxo, começando do ponto inicial, ou seja, do fluxo residual  $\varphi_R$  um valor de corrente pode ser encontrado a partir da curva de saturação e representado no eixo do tempo. Tal correspondência pode ser observada pelo valor de corrente  $I_m$ . O valor da corrente de excitação decai para os primeiros ciclos, mas após isso passa a decair de forma bem lenta. Geralmente são necessários

alguns segundos para que a corrente retorne aos seus valores normais.

Figura 5 - Relações entre a Curva de Saturação e a Magnitude da Corrente de *Inrush*.



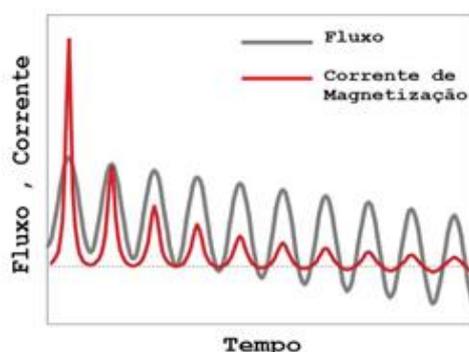
Fonte: Adaptado de Anderson (1999).

Para transformadores trifásicos, cada fase terá sua própria corrente de magnetização, pois o ponto em que a tensão é aplicada permite que a energização do transformador ocorra em instantes diferentes. A magnitude da corrente de *inrush* também depende do tipo de material do núcleo do transformador, ou seja, das características construtivas, além do tipo de conexão realizada, no caso dos transformadores trifásicos (ANDERSON, 1999).

Algumas precauções adicionais são necessárias para prevenir a atuação indevida de relés ou *false tripping*. Sabe-se que dependendo do instante em que a energização do transformador é realizada a corrente de magnetização ou corrente de *inrush* pode atingir valores várias vezes maiores que a própria corrente nominal do transformador. O pior caso ocorre quando duas condições são estabelecidas juntas: (i) quando o transformador é energizado exatamente no instante em que a tensão senoidal na fonte de alimentação passa por zero, com (ii) quando o fluxo residual presente no transformador está no seu valor máximo como indicado na Figura 5 por  $\phi_{max}$ . Esta condição extrema está ligada ao maior risco de saturação do transformador que será ainda maior.

Na Figura 6 ilustra-se o formato característico da corrente de magnetização e do fluxo magnético para cada fase em transformadores de potência utilizados em sistemas reais.

Figura 6 – Corrente de Magnetização e Fluxo Magnético.



Fonte: Chiesa (2010).

A grande porção da corrente de magnetização flui nos enrolamentos no lado da alimentação do transformador e a corrente no secundário apresenta baixíssima magnitude, sendo considerada nula. Já o tempo de decaimento da corrente de *inrush* é rápido para os primeiros ciclos e então se torna lento, como observado na Figura 6. Geralmente alguns segundos são necessários para que a corrente de magnetização atinja níveis normais. A constante de tempo que caracteriza este decaimento da corrente não é a constante  $L/R$  já que as indutâncias podem se tornar variáveis se ocorrer saturação. Sendo assim, a constante de tempo para o regime transitório da corrente de magnetização é uma função do tamanho do transformador e pode variar de alguns ciclos para transformadores de pequenos até minutos para os de grande porte (ANDERSON, 1999).

Após o decaimento da corrente de magnetização transitória tem-se o seu retorno para as suas características e níveis de regime, ou seja, com valores de magnitude de algumas frações da corrente nominal de modo que durante este período de esforço sobre o transformador as condições detectadas por um dispositivo de proteção, como por exemplo, o relé diferencial, são muito parecidas com as encontradas nos casos de faltas internas no transformador de potência, mesmo assim a proteção não deve atuar pois deve-se entender estas grandezas como características previstas e necessárias para o funcionamento da máquina elétrica.

Podem-se destacar então os principais motivos pelos quais existe dificuldade de se calcular e determinar a corrente de magnetização, dentre eles:

- Necessidade de se calcular graficamente o valor de densidade de fluxo para valores altos de fluxo magnético;
- Laços de histerese, quando são obtidos, mesmo que para valores médios, não são aplicáveis a cada transformador em particular;
- Aleatoriedade – O valor da corrente de *inrush* depende do exato instante de magnetização do transformador e do valor da densidade de fluxo residual em cada transformador.

### 2.3.2 Componentes harmônicas da corrente de magnetização

A proteção de transformadores de potência passa não apenas por avaliar as magnitudes das correntes presentes no transformador, como também determinar e diferenciar se a corrente observada é realmente uma corrente que caracteriza uma falta no transformador ou se o equipamento está apenas sendo energizado, quando está presente a corrente de magnetização. A seguir analisam-se as características das componentes harmônicas da corrente de magnetização, como forma de obter mais informações sobre a dinâmica de operação do transformador.

Na corrente de magnetização verificam-se todas as ordens de harmônicas, mas o destaque está nas 2ª e 3ª componentes harmônicas, que apresentam magnitudes muito maiores que as demais. A componente DC ou *offset* sempre está presente na corrente de *inrush* de um transformador trifásico, apresentando *offsets* diferentes para cada uma das três fases. Os valores das componentes DC também sofrem influência do fluxo residual presente em cada energização do transformador. Se no exato instante da energização do conjunto o fluxo residual em alguma das fases coincide com um valor de fluxo magnético típico em regime permanente, então nessa fase especificamente não será observada a componente DC na corrente de magnetização apesar de que os efeitos nas outras duas fases será de aumento nos valores dessas componentes. A 2ª harmônica está presente em todas as formas de onda de corrente de magnetização, inclusive para os transformadores trifásicos, com a sua magnitude variando de acordo com o grau de saturação do transformador. Quando ocorre saturação do núcleo pode ser que ocorra até mesmo distorção da corrente, mas mesmo essas correntes distorcidas ainda possuem harmônicas ímpares. Nota-se também que correntes de falta não contem a segunda harmônica ou qualquer outra componente par. Para a 3ª harmônica, sabe-se que tal componente pode ser observada com as maiores amplitudes bem como a 2ª harmônica, além do fato que em transformadores trifásicos, as 3ª harmônicas de cada fase estão todas em fase, não aparecendo as correntes de linha para transformadores conectados em  $\Delta$  (ANDERSON, 1999). Sobre as harmônicas de ordem maior, existem alguns interesses na detecção da 5ª harmônica, mas os motivos não serão abordados nesse trabalho.

Na Tabela 1 estão fixados os valores de amplitude comuns para a análise harmônica de uma corrente de magnetização. Componentes podem ser encontradas com a utilização de filtros digitais que analisam os sinais de corrente aplicando a proteção diferencial com restrição por harmônicas. A técnica de proteção de transformadores por restrição de harmônicas é amplamente conhecida e já consolidada como importante componente de diversos sistemas de proteção de transformadores de potência.

Tabela 1 – Análise Harmônica – Corrente de Magnetização.

Componente Harmônica	Amplitude em % da corrente fundamental
2 <sup>a</sup>	63,0
3 <sup>a</sup>	26,8
4 <sup>a</sup>	5,1
5 <sup>a</sup>	4,1
6 <sup>a</sup>	3,7
7 <sup>a</sup>	2,4

Fonte: Mason (1956).

Então, como a 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> harmônicas apresentam magnitude tão maiores que as outras, elas são consideradas como definitivamente presentes e características da corrente de magnetização do transformador, e mais ainda, o fato da 2<sup>a</sup> harmônica estar presente apenas na corrente de *inrush* e não em correntes de falta usuais fornece uma informação que é de grande importância para determinar se a condição observada pelo sistema de proteção é uma falta ou a magnetização do transformador.

Desta forma, alguns critérios são necessários para distinguir entre corrente de *inrush* e faltas internas. Relés diferenciais modernos se atentam a esses critérios pelo fato de que a segunda componente harmônica na corrente de magnetização representa cerca de 70 % da corrente fundamental, ao passo que a corrente de magnetização atinge cerca de 30% (UNGRAD, 1995). Se por acaso uma componente de segunda harmônica for detectada, por exemplo, por um filtro incluído para esse propósito, então a proteção deve permanecer sem atuar.

### 2.3.3 Transformadores de corrente (TCs)

Vários equipamentos auxiliares e técnicas acompanham a proteção diferencial. Neste trabalho, para proteção de faltas internas e externas nos transformadores de potência propõe-se a aquisição da corrente diferencial, efetuada através de transformadores de corrente. Transformadores de corrente são equipamentos auxiliares ligados ao circuito elétrico capazes de reduzir a corrente do sistema de alguns milhares de Ampères para um nível que os circuitos de medição e proteção podem lidar. Em instalações de alta tensão os enrolamentos primários estão no potencial de alta tensão do sistema e então os TCs devem ser capazes de promover tal isolação entre os potenciais desse circuito e o circuito de proteção.

Dependendo da proposta de proteção, os transformadores de corrente podem ter projetos de núcleos diferentes. Núcleos de transformadores de corrente utilizados em medição são propositadamente projetados

para não suprir nenhuma corrente de secundário maior que 1,2 vezes o valor de sua corrente nominal para evitar sobrecarregar equipamentos mais sensíveis do circuito de medição. Apenas nos níveis de sobrecorrente é que os TCs devem transformar a corrente primária corretamente para habilitar os equipamentos de proteção a detectarem uma possível falta de forma mais eficiente. Geralmente a corrente no primário é especificada com valor maior ou igual à corrente nominal do equipamento a ser protegido, já as correntes no secundário são comumente fixadas para faixas entre 1,0 [A] e 5,0 [A]. Uma corrente de secundário de 5,0 [A] é comum para sistemas de potência de média tensão e correntes acima de 1 [A] são usadas para sistemas acima de 110kV. As potências escolhidas para os TCs também são importantes e definidas em potência aparente (VA) onde essa potência não pode ser excedida durante a operação do TC, ou seja, deve ser suficiente para suportar as cargas de cada um dos equipamentos conectados ao TC. Os níveis mais comuns de potência para transformadores de corrente para instrumentação são 10, 15, 30 e 60 VA (UNGRAD, 1995).

Na Figura 3 ilustram-se as ligações dos TCs para o transformador de potência, bem como o princípio de funcionamento do relé diferencial digital. Para cada fase, as correntes diferenciais são fixadas  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$ ,  $I_{d3}$  e representadas pelas equações:

$$\begin{aligned} I_{d1} &= [(i_{ap} - i_{cp}) - (i_{as} - i_{cs})] \\ I_{d2} &= [(i_{bp} - i_{ap}) - (i_{bs} - i_{as})] \\ I_{d3} &= [(i_{cp} - i_{bp}) - (i_{cs} - i_{bs})] \end{aligned} \quad (3)$$

Onde  $I_{ap}$ ,  $I_{bp}$ ,  $I_{cp}$  são as correntes no lado primário do transformador nas fases A,B e C e  $I_{as}$ ,  $I_{bs}$ ,  $I_{cs}$  são as correntes no lado secundário do transformador trifásico. O relé deve atuar quando as correntes  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$ ,  $I_{d3}$  atingem o limiar da curva de operação do relé diferencial.

### 3 A TRANSFORMADA WAVELET

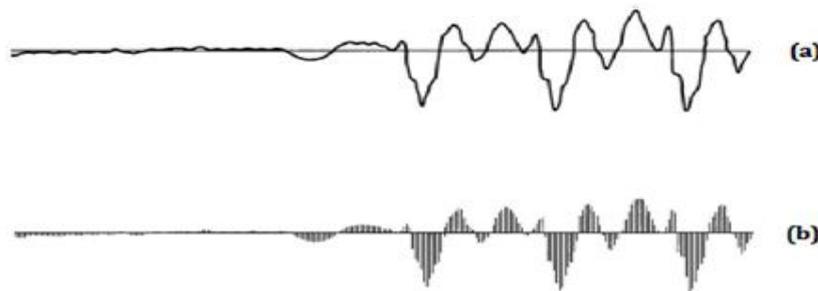
Neste capítulo são expostos os conceitos sobre a transformada *wavelet* utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho. Embora a transformada de Fourier tenha sido a ferramenta matemática mais utilizada para realizar a análise do conteúdo de frequências de um sinal, também conhecida como análise espectral, a transformada *wavelet* vem sendo utilizada em diversas áreas, o que justifica o crescente número de trabalhos que utilizam a transformada *wavelet* bem como suas ferramentas em diversas aplicações de engenharia e de modo geral, na análise e processamento de sinais.

### 3.1 A transformada wavelet – conceitos gerais e filosóficos

A transformada de Fourier pode ser considerada a predecessora da transformada *wavelet* em vários aspectos. Dentre as diversas vantagens da transformada de Fourier, também conhecida como a resposta em frequência de sinais, está a praticidade de se realizar a análise do comportamento do sistema, já que atualmente existem diversos estudos, *softwares* e ferramentas desenvolvidas que permitem sua vasta utilização.

Sinais de tempo contínuo são definidos e representados por uma variável independente contínua, como o tempo, por exemplo. Sinais de tempo contínuo são geralmente associados aos sinais analógicos. Sinais de tempo discreto são definidos em tempos discretos e desse modo a variável independente também é representada por valores discretos, ou seja, são representados por uma sequência ou uma série de números do tipo  $x[n]$  (OPPENHEIM ; SCHAFER, 1998). A Figura 7 mostra como um sinal de tempo contínuo pode ser representado por uma sequência de números, podendo ser obtida uma representação discreta do sinal.

Figura 7 – Sinal (a) de Tempo Contínuo e sua Representação (b) por um Conjunto de Sequências.



Fonte: Oppenheim e Schaffer (1998).

Matematicamente, representa-se uma sequência por uma integral, chamada integral de Fourier e pode-se também utilizar a representação por uma somatória, chamada transformada de Fourier inversa. A seguir tem-se a transformada discreta de Fourier ou *Discrete Fourier Transform* (DFT).

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} \quad (4)$$

$$X[e^{j\omega}] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-j\omega n} \quad (5)$$

onde  $X(e^{j\omega})$  é a transformada de Fourier ou a representação de uma sequência discreta  $x[n]$  no domínio da frequência. Também é fixada a frequência angular  $\omega = 2\pi f$  para um sinal com frequência  $f$ .

As equações (4) e (5) formam a representação de uma sequência utilizando a análise de Fourier.

Como a representação em forma de sequências é uma forma natural para o tratamento computacional, então um sinal temporal pode ser coletado, e utilizando a DFT pode-se determinar o conteúdo de frequências desse sinal, bem como a magnitude e a fase dessas frequências. Saber qual é o conteúdo de frequências de um sinal é importante para diversas aplicações teóricas como análises matemáticas, bem como aplicações práticas nas engenharias e diversas outras áreas. A análise espectral sempre foi uma ferramenta muito utilizada na análise de sinais, mas apresenta suas limitações, pois a transformada de Fourier é capaz de determinar apenas “qual” frequência compõe o sinal, mas não consegue determinar “quando” essa frequência ocorre. A transformada de Fourier serve para analisar sinais estacionários, pois o conteúdo de frequência desses tipos de sinais não muda no tempo. Então, quando se utiliza a transformada de Fourier, não é necessário determinar quando uma determinada componente de frequência existe, pois se sabe que esses valores não mudam para esses tipos de sinais (OPPENHEIM ; SCHAFER, 1998).

Apesar desta limitação, a transformada de Fourier ainda ocupa um espaço muito importante para se realizar a análise do conteúdo de frequência de sinais, pois atualmente existem diversos algoritmos computacionais que proporcionam um simples e rápido cálculo da DFT. Esses algoritmos são conhecidos como transformada rápida de Fourier ou *Fast Fourier Transform* (FFT). Para realizar o tratamento de sinais não estacionários a transformada de Fourier não é mais válida.

As primeiras ideias para que pudesse ser possível o trabalho com sinais não estacionários apareceram com a proposta da técnica *windowed Fourier Transform* (WFT) ou a chamada *Short Time Fourier Transform* (STFT). Nessa técnica o sinal é dividido em seções para análise e são escolhidas janelas com frequências de corte capazes de acusar e verificar se uma componente de frequência está na seção, após isso uma nova seção é escolhida e analisa-se outro intervalo do sinal e o processo segue até a varredura total do sinal analisado. Essa técnica, apesar de ser interessante, apresentava suas desvantagens, pois infelizmente as janelas escolhidas deviam ter um tamanho fixo e a escolha do tamanho da janela era um trabalho mais intuitivo. Janelas pequenas dariam como resposta pouca informação sobre o sinal e muito processamento que se traduz em maior esforço computacional, já escolher uma janela grande aumentaria os erros dos cálculos.

Para desenvolver uma transformada com janelas que pudessem ter tamanho variável iniciaram-se as pesquisas com a transformada *wavelet* de tempo contínuo ou a *Continuous Wavelet Transform* (CWT) até chegar à Transformada *Wavelet* de Tempo Discreto ou a chamada *Discrete Wavelet Transform* (DWT). O surgimento da análise *wavelet* contou com a contribuição de diversos pesquisadores é uma ferramenta que surgiu de estudos em diversas áreas do conhecimento, fato que aponta o motivo pelo qual se trata de uma ferramenta abrangente e aplicável em diversas áreas do conhecimento. A primeira citação de *wavelets* data de 1909 na tese de Haar, mas esta transformada não foi utilizada até a década de 30 quando começaram a aparecer pesquisas que buscavam representar funções que utilizam uma base, mas variam a escala, como por

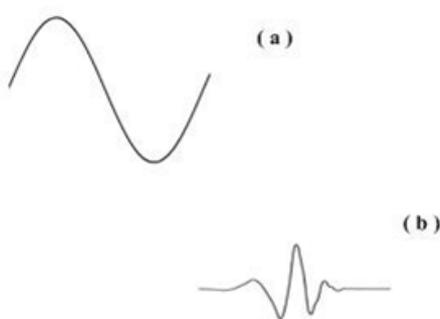
exemplo Paul Levy que estudou os detalhes do movimento Browniano utilizando as bases de Haar pois considerou que as bases de Fourier não atenderiam suas necessidades. Com o passar do tempo a técnica não evoluiu muito e a base de Haar era a única disponível, mas um desenvolvimento relativamente recente para aplicações matemáticas se intensificou na década de 80. Independentemente de como a técnica se desenvolveu e está disponível atualmente para análise do conteúdo harmônico de sinais, nos primeiros contatos com essa ferramenta, Grossmann e Morlet estudaram a transformada *wavelet* contínua e inicialmente a aplicaram na análise de dados geológicos nos períodos de 1982 a 1985. No entanto, no mesmo período as transformadas *wavelet* fizeram os matemáticos suspeitarem da existência de um bom campo para o desenvolvimento de técnicas, o que se concretizou mais tarde com alguns eventos. O primeiro deles foi o fato de que a matemática Daubechies foi capaz de construir uma classe de *wavelets* básicas que são simples, tinham suporte para compactação e também eram ortonormais. Logo, essas bases foram referenciadas como bases de Daubechies e são aplicadas com sucesso em diversos campos até hoje. São também as primeiras referências para o que mais à frente seriam denominadas *wavelets mães*. Outro evento ocorreu quando Mallat, analisando sinais com o matemático Meyer propuseram um método geral para construir as bases *wavelet*. O termo utilizado foi análise multi-resolução (AMR) ou *Multiresolution-Analysis* (MRA) e foi provada consistente para a análise e processamento de sinais (PERCIVAL ; WALDEN, 2000).

As conquistas que vieram posteriormente abrangem tanto o campo da matemática quanto o campo da engenharia e ficam estabelecidos diversos conceitos teóricos para a análise *wavelet* já que o resultado foi uma importante evolução na teoria de análise de sinais não-estacionários, com um novo método para a análise tempo-frequência. Desse modo, os sinais podem ser caracterizados localmente em ambos os domínios do tempo e da frequência e de acordo com essa propriedade e o grande número de estudos que envolvem esta teoria, tem-se que a análise *wavelet* pode ser aplicada eficientemente.

### 3.2 A transformada wavelet – definições e propriedades

A denominação *wavelet* vem de “pequena onda” ou *short wave*. Do ponto de vista matemático, o significado de “pequena onda” está mais ligado à observação de duração da *wavelet* que tem um tempo limitado, em outras palavras isto quer dizer que as *wavelets* são fenômenos locais, pois são ondas de curta duração com energia concentrada nesse pequeno intervalo de tempo. Então um sinal *wavelet* tem a forma de uma oscilação de curta duração, cuja amplitude varia rapidamente até zero. Uma *wavelet* é um sinal especial no qual duas condições devem ser satisfeitas, a primeira é a de que a *wavelet* deve ser uma onda oscilante e a segunda de que suas amplitudes sejam diferentes de zero apenas durante pequenos intervalos (TANG et al., 2000). A Figura 8 apresenta exemplos típicos de sinais senoidal e do sinal *wavelet* com seus formatos característicos.

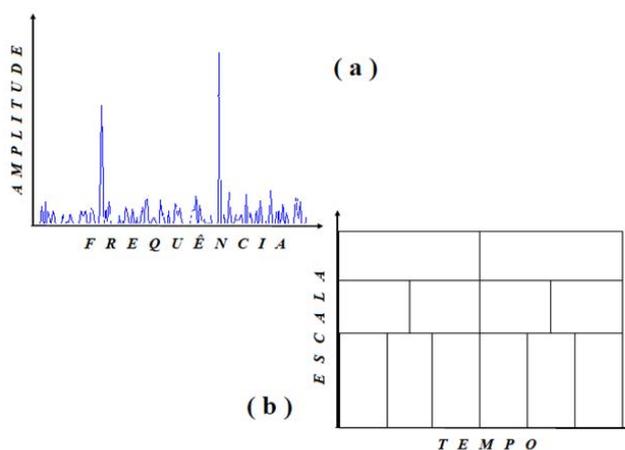
Figura 8 - Formas de Onda (a) Sinal Senoidal (b) Sinal *Wavelet*.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As *wavelets* são definidas no espaço  $L^2(\mathbb{R})$ , também chamado espaço funcional de quadrado integrável e representam um sinal no domínio do tempo e escala (frequência). Assim as *wavelets* decompõem os sinais em conjuntos de bases de funções em diferentes níveis de resolução e tempos de localização.

Figura 9 – Particularidades das Técnicas (a) Análise Fourier e (b) Análise Wavelet.

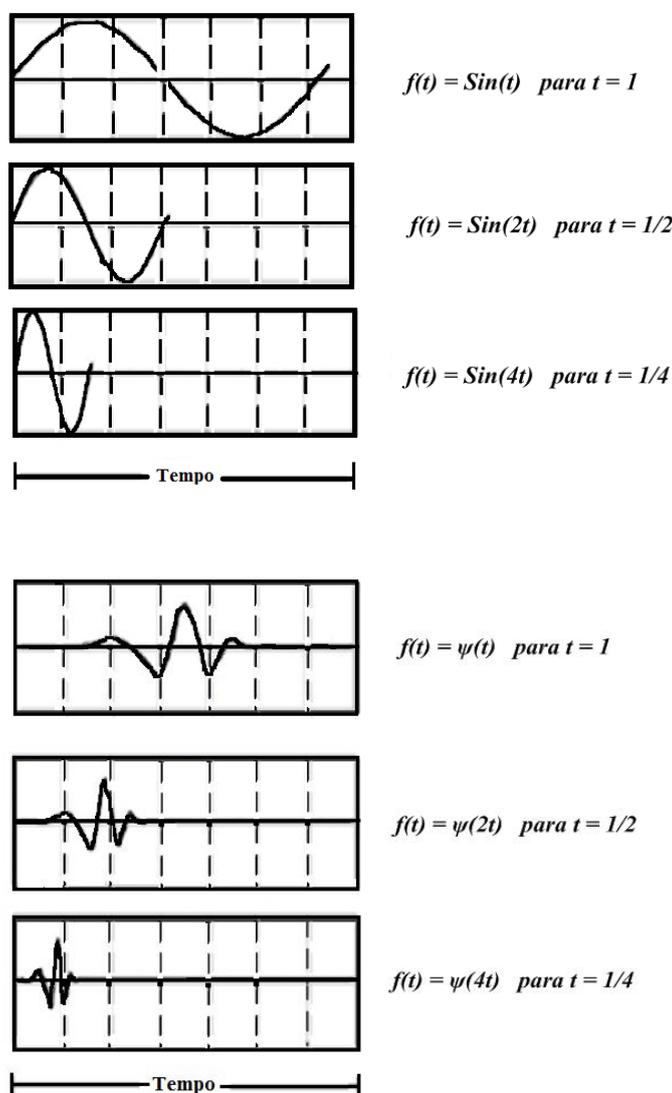


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A divisão da Figura 9(a) e 9(b) é intuitivamente utilizada para demonstrar como a transformada de Fourier é capaz de detectar conteúdos de frequência de sinais utilizando um sistema de coordenadas divididos em amplitude e frequência ao passo que a transformada *wavelet* divide o seu espaço de análise no domínio da frequência através de janelas de tamanhos variáveis e assim permite a detecção de um conteúdo de frequência procurado bem como sua localização no tempo. O escalonamento para qualquer *wavelet* simples quer dizer comprimir ou alongar a *wavelet*. Na Figura 10 a seguir tem-se um exemplo da

propriedade de escalonamento de uma função utilizando o fator de escala “a”.

Figura 10 – Escalonamento para uma Função Senoidal e para uma *Wavelet*.



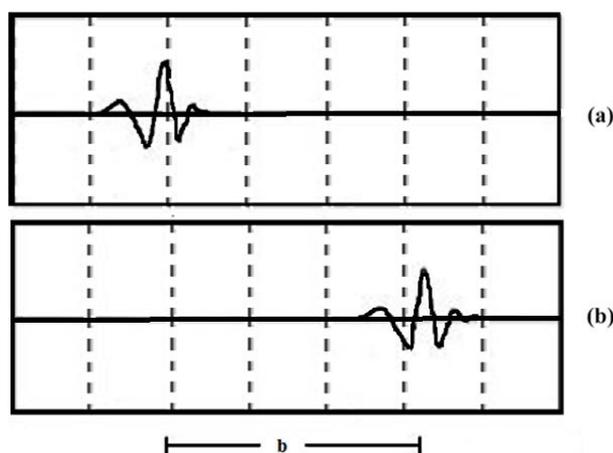
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se que quanto menor for o fator de escala tem-se como resultado uma *wavelet* mais comprimida. A existência do fator de escala é uma das principais propriedades da transformada *wavelet*. Um fenômeno de compressão ocorre quando  $a < 1$  e a dilatação do sinal ocorre quando  $a > 1$  conforme a *wavelet* mãe se desloca no tempo e origina as *wavelets* filhas que possuem a mesma forma. Assim uma *wavelet* que sofre compressão representa detalhes que mudam rapidamente, ou seja, alta frequência, ao passo que uma *wavelet* expandida representa baixas frequências, com detalhes que mudam de forma mais lenta.

Outra propriedade importante das *wavelets* é a capacidade de translação, representada aqui pelo fator

de translação “b” que nada mais é que um deslocamento do conjunto, ou matematicamente o deslocamento de uma função  $\psi(t)$  por “b” que pode ser representado por  $\psi(t-b)$ . A Figura 11 apresenta a propriedade de deslocamento de uma função *wavelet*.

Figura 11 - Propriedade (a) Função *Wavelet*  $\psi(t)$  e (b) Translação.  
da Função *Wavelet*  $\psi(t-b)$ .



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os fenômenos de escalonamento e translação se relacionam para a transformada *wavelet*, e desta forma são interdependentes. Para a aplicação na proteção de transformadores a presença de um sinal *wavelet* indica a detecção de uma frequência desejada. Então se utilizam estas duas propriedades para indicar que o sinal *wavelet* pode se deslocar no domínio do tempo através da translação para indicar o instante em que uma frequência procurada é observada, bem como apresentar as características da frequência encontrada quando se atenta ao coeficiente de escalonamento.

Uma característica importante da transformada *wavelet* está no princípio de conservação de energia, ou seja, a energia total das *wavelets* em qualquer escala de representação devem ser iguais à energia da *wavelet* mãe porque é preciso manter a capacidade de comparação entre as escalas. A análise e equações seguintes apresentam o processo de desenvolvimento de uma *wavelet* mãe, que serve de base para introduzir a transformada *wavelet*.

Pode-se definir como uma condição necessária para, matematicamente, existir uma *wavelet* mãe a equação (6).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (6)$$

onde a função  $\psi(t)$  pertence ao espaço  $L^2(\mathbb{R})$  e demonstra que uma *wavelet* mãe é uma função que oscila, tem

energia finita e valor médio nulo. As *wavelets* filhas são geradas a partir de operações de escalonamento "a" e translação "b" efetuadas na *wavelet* mãe de acordo com a expressão a seguir (BÍSCARO, 2013).

$$\psi_{a,b}(t) = \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (7)$$

Considerando a aproximação feita por Daubechies (1992), com as equações (8) e (9).

$$\|\psi_{a,b}(t)\| = \|\psi\| \quad (8)$$

$$\|\psi\| = 1 \quad (9)$$

Então se garante que as *wavelets* filhas têm a mesma energia da *wavelet* mãe ao se aplicar a condição de energia unitária da *wavelet* mãe para as *wavelets* filhas correspondentes.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^2\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) * \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = 1 \quad (10)$$

considerando  $\xi = \frac{t-b}{a}$  e  $dt = a.d\xi$  tem-se:

$$a \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(\xi) * \psi(\xi) d\xi = 1 \quad (11)$$

Eliminando o fator "a" da equação (10) utilizando uma técnica matemática de multiplicação por um fator constante igual a  $\frac{1}{\sqrt{a}}$  que serve para normalizar a função  $\psi_{a,b}(t)$ , então são garantidas as energias unitárias para todas as *wavelets* filhas, já que a condição de energia unitária é garantida para todas as escalas disponíveis, ou seja, a todas as *wavelets* filhas, como mostra a equação (12), onde  $a, b \in \mathbb{R}$  sendo  $a \neq 0$ . As análises apresentadas anteriormente fixam dois conceitos muito importantes na teoria da transformada *wavelet* e concluem que o princípio de conservação de energia se aplica aos coeficientes da transformada para todas as escalas disponíveis, já que as *wavelets* mães e as *wavelets* filhas têm relação direta.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (12)$$

Assim, pode-se concluir que pelo estudo dessas primeiras propriedades e pelo princípio da conservação de energia que na decomposição do sinal da análise *wavelet* a energia do sinal original

analisado se divide entre os coeficientes da transformada.

De forma geral, existem basicamente dois tipos de *wavelets*. O primeiro tipo é resultado do que se conhece como a transformada *wavelet* contínua ou *Continous Wavelet Transform* (CWT) que foi desenvolvida para tratar de sinais que estão definidos em todo o eixo real. O segundo tipo é a transformada *wavelet* discreta *Discrete Wavelet Transform* (DWT) que trata das séries definidas em limites inteiros (geralmente  $t = 0, 1, \dots, N-1$ , onde  $N$  representa o número finito de valores obtidos do sinal), já que sinais de tempo discreto são definidos apenas para certos intervalos.

Apresentando inicialmente a chamada transformada *wavelet* contínua (TWC), tem-se que ela é utilizada para analisar uma função de grandezas contínuas. Como sempre deve ser citada a *wavelet* mãe utilizada, então as condições observadas para uma transformada são individuais e não são as mesmas, caso se utilize outro tipo de *wavelet* mãe. Pode-se iniciar a análise considerando uma *wavelet* mãe  $\psi(t)$ , então a transformada *wavelet* contínua de uma função  $f(t)$  definida no espaço  $L^2(R)$  é dada pela equação (13) considerando “a” o fator de escala e “b” o fator de translação.

$$TWC(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (13)$$

Então o sinal unidimensional  $f(t)$  é mapeado tomando a forma de uma nova função, agora no espaço bidimensional tendo sua escala de translação “b” proporcionada pela transformada *wavelet* (TW). Observa-se também que  $TWC(a,b)$  nada mais é do que um grupo de coeficientes associados à transformada *wavelet* de um sinal original  $f(t)$  com relação a uma *wavelet* mãe  $\psi(t)$ . Na transformada *wavelet* é possível analisar as componentes de baixa frequência de um sinal utilizando pequenos fatores de escala, bem como analisar as componentes de alta frequência utilizando fatores de escala maiores, já que o fator de escala “a” e a *wavelet* mãe escolhida são interdependentes. Sendo assim, a TWC pode ser associada como uma operação de filtragem de um sinal de entrada  $f(t)$ .

A concepção da transformada *wavelet* discreta (TWD) vem da necessidade de utilizar a transformada *wavelet* contínua em aplicações práticas e levar a técnica ao processamento de sinais e aplicações computacionais. Isso abriu uma grande variedade de estudos para a transformada *wavelet* e foi de extrema importância para o grande interesse a respeito dessa ferramenta. A discretização da transformada *wavelet* ocorre nos domínios dos parâmetros de escala e translação, não ocorrendo mudanças na variável independente como tempo ou espaço que são as mais observadas. Na transformada *wavelet* discreta ocorre uma representação de qualquer sinal no domínio  $L^2(R)$  por uma série de equações (14) utilizando uma função de expansão generalizada  $f(t)$ . Novamente, pode-se realizar a análise considerando uma *wavelet* mãe  $\psi(t)$  a partir de uma função discreta  $f(n)$  definida no espaço  $L^2(R)$  obtendo a expressão (15) a *transformada wavelet discreta*. Sendo a *wavelet* mãe correspondente e, aqui os parâmetros de translação e escala são

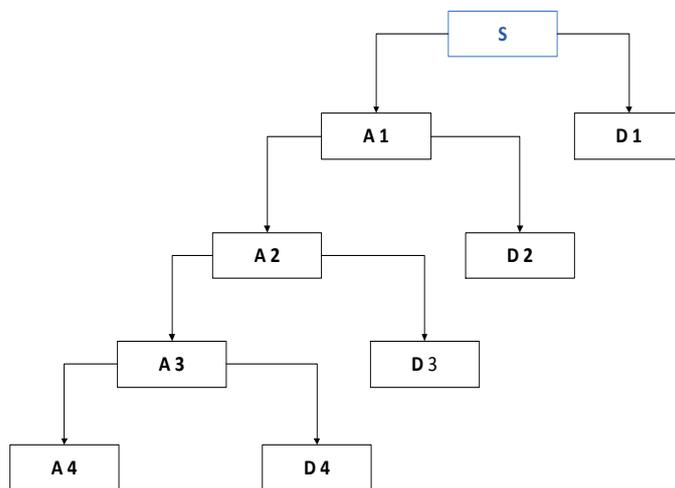
funções dos valores inteiros  $m$  e  $n$  na forma  $a=a_0^m$  e  $b=n.b_0.a_0^m$  que ajudam a caracterizar a discretização da transformada (BURRUS et.al., 1998).

$$f(t) = \sum_{j,k} a_{j,k} 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \quad (14)$$

$$TWD(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum f(n) \psi\left(\frac{x-nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (15)$$

A transformada *wavelet* discreta é um tipo de transformada que faz parte das técnicas de análise e processamento de sinais que se utilizam de partições e tratamentos multi-resolução. Para implementar a transformada *wavelet* são necessárias três estruturas básicas, um sinal de entrada, um filtro  $h(k)$  passa alta e outro  $l(k)$  passa baixa característicos de cada análise *wavelet* e da *wavelet* mãe. Dessa forma, para  $j, k \in Z$  são introduzidos os coeficientes *wavelet* que, matematicamente, são calculados com a relação  $a_{j,k} = [x(t), \phi_{j,k}(t)]$  definida como *coeficiente de aproximação* bem como a relação  $d_{j,k} = [x(t), \psi_{j,k}(t)]$  definida como *coeficiente de detalhe* (PERCIVAL; WALDEN, 2000). A Figura 12 apresenta a decomposição Multi-Nível de um sinal quando se aplica a transformada *wavelet*.

Figura 12 - Decomposição Multi-Nível de um Sinal.

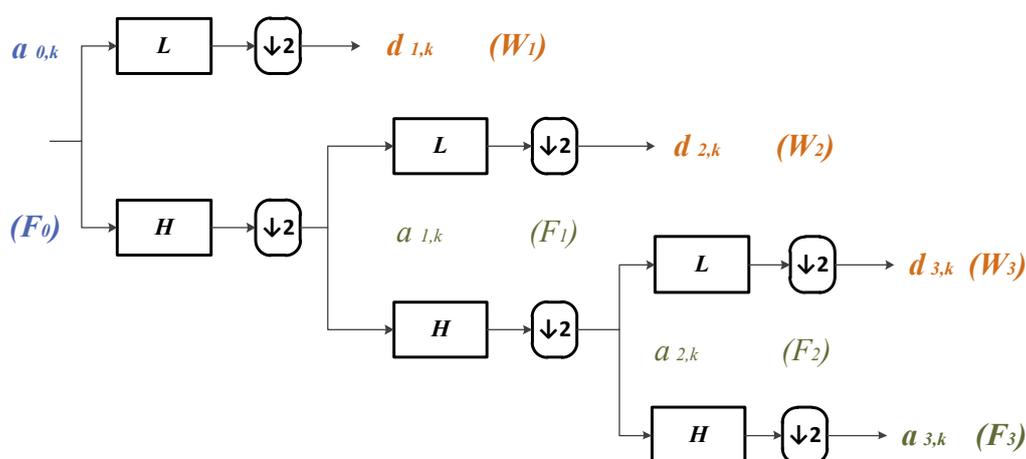


Fonte: Elaboração do próprio autor.

A transformada *wavelet* pode ser interpretada como uma filtragem seguida de um *downsampling* ou diminuição na taxa de amostragem, assim considerando um coeficiente  $a_{j,k}$  em um nível  $j$  então  $a_{j,k}$  terá metade do número de coeficientes de  $a_{j-1,k}$  no nível  $j-1$ , acontecendo o mesmo para  $d_{j,k}$  de tal forma que o

o sinal final decomposto tem a mesma quantidade de dados do sinal inicial original. O processo é o mesmo para todos os níveis da transformada e segue até o nível necessário para a análise do sinal em estudo. Seguindo primeiramente o processo de decomposição do sinal, os filtros  $L$  e  $H$  são definidos como  $L=[l(k)]$  e  $H=[h(k)]$  e são importantes para a representação do sinal e se relacionam entre eles. Na Figura 13 cada amostra de entrada é removida na proporção de *downsampling* de 2, representado pelo símbolo  $\downarrow 2$  para manter constante o formato do sinal original.

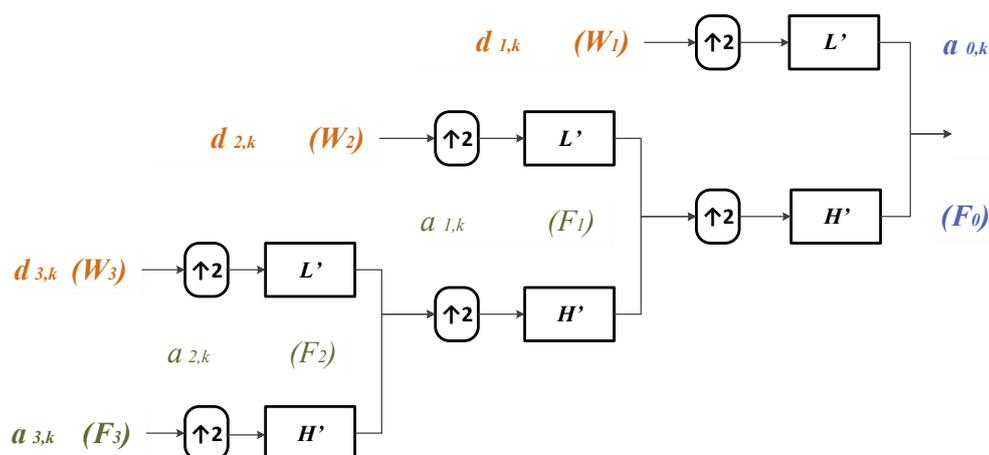
Figura 13 - A Decomposição do Sinal *Wavelet*.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para um sinal  $S(k)$  pertencente ao espaço de funções  $F_0$ , quando se realiza a decomposição do sinal tem-se como resultado os coeficientes  $d_{1,k}$  e  $a_{1,k}$  que pertencem aos espaços  $W_1$  e  $F_1$ , respectivamente, e que são então versões escalonadas do espaço  $F_0$ . Então o sinal original fica subdividido em outros dois sinais, mas com faixas diferentes de frequência, onde cada novo nível de decomposição apresenta uma faixa de frequência única. O nível de decomposição do sinal depende do projeto e de quais faixas de frequências se deseja atingir.

A transformada *wavelet* é uma ferramenta poderosa e da mesma forma que se tem a decomposição do sinal também é possível sua reconstrução ou síntese, sem perda de informação. A figura a seguir apresenta o processo de *upsampling* que nada mais é que o alongamento dos componentes do sinal decomposto mantendo seu formato conforme muda de nível e caminhando na direção do último nível que é retornar ao sinal original. O *upsampling*, representado na Figura 14 pelo símbolo  $\uparrow 2$ , realiza a inserção de zeros entre as amostras e também trabalha com filtros passa baixa e passa alta para determinar as faixas de frequência de cada nível. Neste caso os filtros de reconstrução são representados por  $L'=[l'(k)]$  e  $H'=[h'(k)]$

Figura 14 – A Reconstrução ou Síntese do sinal *Wavelet*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A escolha dos filtros é importante para se obter a perfeita reconstrução do sinal original. O *downsampling* das componentes do sinal, durante o processo de decomposição, pode introduzir uma distorção chamada *aliasing* (OPPENHEIM ; SCHAFER, 1998), também causada por utilizar uma frequência de amostragem inadequada. A perfeita reconstrução do sinal é de fato possível se os filtros para as fases de decomposição e de síntese do sinal forem bem escolhidos.

Então a transformada *wavelet* é capaz de fornecer informação do tempo e da frequência, simultaneamente, passando um sinal no domínio do tempo por vários filtros passa-baixa e passa-alta. Esse processo sempre é repetido conforme certas seções de sinal que correspondem a certas frequências vão sendo removidas do sinal original, pois a saída da transformada *wavelet* é um conjunto finito de coeficientes *wavelet* e tem-se como característica principal, que as escalas e posições desses coeficientes são definidos em potência de 2. As frequências que cada coeficiente cobrirá vão depender também da frequência de amostragem, então se tem uma frequência de amostragem  $f_s$ , o primeiro detalhe da *wavelet* cobre de  $f_s/2$  até  $f_s/4$ , o segundo detalhe cobre de  $f_s/4$  até  $f_s/8$  e assim sucessivamente, até quantos detalhes forem necessários para checar a existência de uma frequência específica no sinal.

Essencialmente a função da transformada *wavelet* é indicar o quanto um valor médio de uma função varia dentro de um período de análise com relação a outro período (PERCIVAL ; WALDEN, 2000). Essa interpretação da análise *wavelet* é a chave principal para se entender as aplicações dessa transformada, bem como as aplicações particulares realizadas nesse trabalho. A princípio define-se  $x(\cdot)$  como uma função real cuja variável independente  $t$  referida como tempo, por conveniência, pois  $t$  pode ser qualquer variável e pode ter outras unidades. Pode-se referir a  $x(\cdot)$  como um sinal e considerando a integral:

$$\frac{1}{b-a} = \int_a^b x(u) \equiv \alpha(a, b) \quad (16)$$

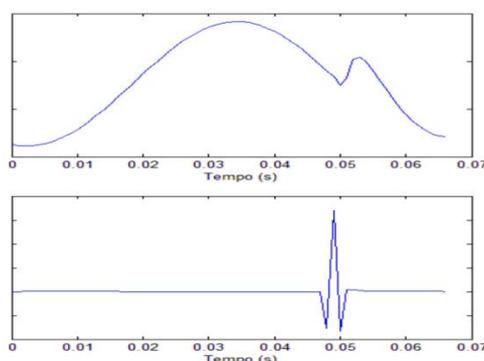
Onde se assume que  $a < b$  e que  $x(\cdot)$  é definida em toda a integral. Também define-se  $\alpha(a, b)$  como o valor médio de  $x(\cdot)$  sobre o intervalo  $[a, b]$ . Ao invés de levar em consideração um valor médio como  $\alpha(a, b)$  como uma função de cada ponto do intervalo  $[a, b]$  sobre qual a integral é definida, é possível considerar facilmente como uma função do tamanho do intervalo levado em consideração, ou seja,  $\lambda = b - a$ , e o tempo central do intervalo é o tempo  $t = (a + b)/2$ . Então  $A(\lambda, t)$  considerado como o valor médio do sinal  $x(\cdot)$  sobre a escala de  $\lambda$  centrado no tempo  $t$ .

$$A(\lambda, t) \equiv \alpha\left(t - \frac{\lambda}{2}, t + \frac{\lambda}{2}\right) = \frac{1}{\lambda} \int_{t-\frac{\lambda}{2}}^{t+\frac{\lambda}{2}} x(u) du \quad (17)$$

Tem-se então que o objetivo de estudar e utilizar a transformada *wavelet* está na busca pelo comportamento dos valores médios de sinais, determinar as magnitudes desses valores e saber os momentos que mudam. Como as *wavelets* também permitem mudança de escala, muitas vezes se torna interessante atentar para as informações o que cada escala revela do que atentar para a média em si.

Um distúrbio no sistema de energia elétrica, geralmente, é representado por um pulso transitório na forma de onda de tensão ou corrente de modo que se tem a modificação do valor médio desses sinais durante o intervalo analisado. Na Figura 15 ilustra-se tal característica de detecção de um distúrbio em um sinal. Independentemente do sinal analisado, para aplicações em sistemas de energia elétrica, a transformada *wavelet* é bastante eficiente para apontar mudanças ocorridas nos sinais, exatamente pela capacidade de buscar detectar as modificações nos valores médios.

Figura 15 – Conceito de Detecção de Distúrbio em um Sinal Utilizando a Transformada *Wavelet*.



Fonte: Biscaro (2013).

Quando se utiliza a transformada *wavelet* para realizar a análise de um sinal, tem-se que as informações são divididas em sub-sinais de aproximação e detalhe. Existem diversas características importantes quando se observa um sinal decomposto por uma transformada *wavelet*, já que, de acordo com a teoria apresentada de análise multirresolução (AMR), a divisão entre esses dois coeficientes ocorre devido a filtragem do sinal original em dois tipos de filtros, um passa-baixa e outro passa-alta. O filtro passa-baixa fornece o *coeficiente de aproximação* do sinal e a componente de baixa frequência. O filtro passa-alta fornece o *coeficiente de detalhe* do sinal representado pelas altas frequências.

A energia de um sinal é a soma dos quadrados de seus valores a cada instante (OPPENHEIM ; SCHAFER, 1998). As equações (18) e (19) fornecem o cálculo da energia  $E$  de um *sinal discreto*  $x(n)$  através da soma da energia do sinal de cada amostra  $n$ .

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 \quad (18)$$

No caso de um intervalo finito  $[0, N]$ :

$$E = \sum_{n=0}^N |x(n)|^2 \quad (19)$$

Na transformada *wavelet*, como o sinal original é dividido em aproximação e detalhe, a energia total do sinal fica dividida entre esses dois coeficientes, mas o seu valor total não muda (ZENDEHDEL, 2011).

Analisando as características dos sinais de correntes de *inrush* e de faltas em transformadores, é possível encontrar índices que relacionam as características das energias desses sinais. Ressalta-se que para um sistema em condições de operação normais os valores dos componentes de detalhe são praticamente nulos.

A análise do comportamento dos sinais de energização e faltas em transformadores permitiu identificar a natureza destes sinais. Durante o desenvolvimento deste trabalho esta análise foi muito importante para determinar as estratégias adequadas para se aplicar a transformada *wavelet* na proposta de proteção diferencial e determinar quando o transformador está em processo de energização ou quando está sofrendo uma falta ou problema de funcionamento.

Neste capítulo apresentaram-se diversos conceitos e propriedades da transformada *wavelet* utilizados em diversas etapas de desenvolvimento do trabalho, com o objetivo de usar alguns destes conceitos importantes para o desenvolvimento do sistema de proteção de transformadores de potência a partir do relé diferencial numérico.

## 4 A PROPOSTA DE TRABALHO

A proteção diferencial é uma técnica eficiente quando bem implementada, obedecendo às características da máquina elétrica e dos equipamentos de medição e proteção. Neste capítulo apresentam-se as principais informações sobre a modelagem do sistema de energia elétrica estudado, bem como as técnicas para a utilização de ferramentas ou *softwares* diversos indispensáveis para a realização da simulação do sistema a partir de seus dados obtidos com base em sistemas reais. Complementa-se o projeto de proteção e tratamento de dados com o desenvolvimento de um algoritmo de um relé numérico que obedeça a dinâmica do sistema elétrico bem como apresente resultados e informações ao usuário, capazes de indicar o tipo de defeito que possa comprometer a integridade física do transformador de potência.

### 4.1 Metodologia

A atenção com relação aos efeitos das correntes de magnetização em transformadores vem crescendo muito, pois se sabe que as magnitudes de tais correntes podem alcançar valores até mesmo maiores que os valores das correntes da máquina elétrica em plena carga e causar a atuação inadequada de relés.

Nesta seção apresenta-se a metodologia utilizada na implementação do projeto de proteção diferencial de transformadores de potência. O objetivo do trabalho é apresentar uma técnica para proteção de transformadores onde se utiliza como ferramenta de análise matemática e computacional a transformada *wavelet*. As principais características da metodologia proposta são apresentadas a seguir.

#### 4.1.1 Os componentes do sistema elétrico de potência

A metodologia é iniciada com a elaboração do projeto do modelo do sistema elétrico de potência utilizado para testes. Os componentes são os modelos da fonte de alimentação, do transformador de potência, da linha de transmissão e da carga conectada na barra final do sistema. Também são alocados os modelos dos dispositivos de manobras como os disjuntores e chaves em pontos estratégicos do SEP a fim de serem observados e analisados os fenômenos desejados. Todas as máquinas elétricas têm a possibilidade de serem modeladas através do *software* ATP/EMTP (*Alternative Transient Program/Electromagnetic Transient Program*) utilizando a ferramenta ATPDraw e algumas bibliotecas de modelagem de componentes disponíveis nesse *software*. A etapa de elaboração e construção do modelo do sistema teste é importante para o trabalho, pois nesta etapa estão consideradas no modelo muitas das principais características dos equipamentos utilizados, além de características que devem estar de acordo com normas preestabelecidas para esses tipos de equipamentos.

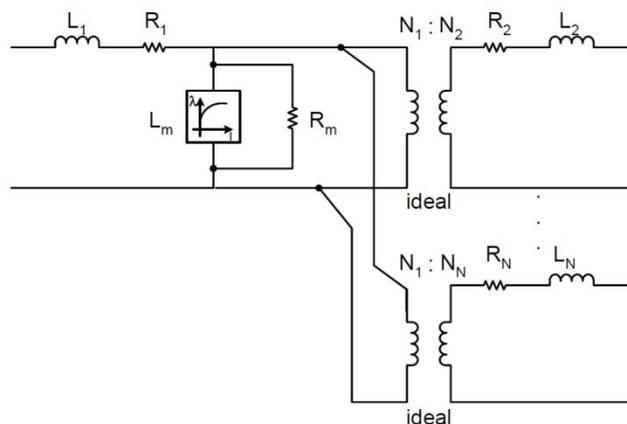
Como resultado, tem-se um modelo de máquinas elaborado através de um *software* confiável e cujos resultados são mundialmente aceitos, que permite ao usuário trabalhar com modelos de equipamentos mais realistas no sentido de que as máquinas elétricas projetadas no ATP/EMTP responderão às mudanças nas variáveis do circuito elétrico da forma mais parecida possível com sistemas reais, seja durante uma manobra de energização ou mesmo quando o transformador sofrer uma falta ou defeito elétrico.

O gerador é a primeira máquina elétrica modelada no *software* ATP/EMTP utilizando o pacote de modelos da interface ATPDraw. Neste caso atenta-se para as principais características do gerador que são sua tensão nominal e frequência de trabalho que não mudam seus limites durante todo o período de simulação. O projeto do gerador é muito simples e permite apresentar um comportamento muito satisfatório com relação à máquina elétrica em condições reais.

O projeto do modelo do transformador de potência é uma etapa muito importante, pois uma das principais características que definem o funcionamento do transformador é a sua curva de saturação. A curva de saturação do transformador de potência expõe as características de tensão com relação à corrente de magnetização do transformador e todas essas características podem ser colocadas no modelo do transformador em ATPDraw. A escolha da curva de magnetização é determinante na quantidade de fluxo residual durante a energização e desenergização dos transformadores de potência e como a corrente de *inrush* depende de tais características, de acordo com a teoria apresentada no capítulo 2, então a escolha de uma curva de saturação que apresente de forma realista as características reais do transformador é muito importante. Diversos catálogos e projetos de transformadores apresentam informações que podem ser utilizadas antes de se optar por uma curva que defina melhor o funcionamento de um transformador.

Entre as diversas técnicas de modelagem de transformadores utilizando o *software* ATPDraw, o modelo *Saturable Transformer Component* (STC) pode representar transformadores polifásicos com diversos enrolamentos e simular a máquina elétrica para diversas aplicações. Em Martinez e Mork (2005) apresentam-se diversos modelos de transformadores trifásicos que compõem as opções disponíveis no ATP/EMTP, destacando que o modelo STC é eficiente para a simulação de transitórios. A Figura 16 ilustra como o *software* ATP/EMTP representa o modelo do transformador quando se utiliza o modelo STC.

Figura 16 - Circuito Equivalente – Transformador Monofásico com N Enrolamentos – ATP/EMTP.



Fonte: Martinez e Mork (2005).

O modelo de um transformador monofásico com N espiras é baseado no circuito equivalente apresentado cuja equação característica é dada pela expressão (20).

$$[L]^{-1}[v] = [L]^{-1}[R][i] + [di/dt] \quad (20)$$

Destaca-se que o produto  $[L]^{-1}[R]$  é simétrico. A saturação e os efeitos de histerese podem ser modelados através da adição de uma indutância não linear extra, incluídos na modelagem através de um nó fictício interno ao transformador representados por  $R_m$  e  $L_m$ . Este modelo pode então ser estendido para unidades trifásicas com a adição do circuito de sequência zero. O ATP/EMTP considera como entradas desse modelo os valores  $R$ - $L$  de cada ramo representado, a relação de transformação bem como as informações características do ramo de magnetização. No caso de transformadores multifásicos, cada fase é tratada como se possuísse um transformador com dois enrolamentos o que permite várias modificações pontuais no modelo original do transformador, como a possibilidade de adicionar ligações que permitam a aplicação de curto-circuito entre enrolamentos ou entre enrolamentos e a terra. As características do núcleo do transformador também podem ser modeladas caso se disponha dos dados da curva de magnetização. A limitação do modelo está no detalhe de que o mesmo não pode ser utilizado para representar transformadores com mais de três enrolamentos. Para modelar transformadores com mais de três enrolamentos a topologia de ligação da resistência  $R_m$  e indutância  $L_m$  pode apresentar erros e instabilidades numéricas mesmo no caso de transformadores trifásicos com três enrolamentos (MARTINEZ ; MORK, 2005). Apesar dessa limitação, o STC encontrado no *software ATPDraw* é compatível com a proposta deste trabalho, sendo assim é o modelo utilizado para as simulações.

No ATPDraw ainda é possível adicionar ao projeto do transformador a utilização de *taps* ou seções

dos enrolamentos para observar o comportamento da máquina elétrica quando seções diferentes dos enrolamentos são selecionadas em processos de faltas ou defeitos no sistema. Tais customizações no projeto podem ser feitas com modificações dos modelos disponíveis no *software* utilizando chaves para atingir tal objetivo. Outros detalhes como perdas características do transformador também podem ser adicionadas, e como esperado, as tensões nos lados primário e secundário, a potência do transformador e os tipos de ligação dos enrolamentos, podendo ser estrela ou triângulo.

O ATP/EMTP é um *software* versátil, tanto que o modelo do transformador trifásico pode ser trabalhado de várias formas e em vários níveis de complexidade. Modificações e customizações são possíveis para desenvolver modelos totalmente diferentes dos disponíveis no pacote do *software*. Para cada projeto simulado no ATP/EMTP uma lista com todas as características do circuito elétrico é gerada. Tal lista tem a extensão “.LIS” e pode ser acessada por um módulo simplificado de editor de texto onde apresentam-se as configurações de todos os elementos do sistema bem como a forma que eles interagem entre si no circuito elétrico, como as posições das chaves, pontos de entrada e saída de máquinas elétricas e posição dos nós do circuito, aproximando o circuito ainda mais de modelos reais. Quando se quer realizar a edição de cada elemento ou modelo de uma máquina elétrica individualmente, e ter acesso a configurações e adições de características mais específicas, também pode ser utilizada a edição do arquivo com extensão “.ATP” e a associação de modelos, lembrando que o ATP/EMTP também permite trabalhar com uma linguagem de programação própria para criar modelos para tratamento de sinais dentro do próprio projeto.

Outro componente do sistema elétrico de potência é a linha de transmissão (LT), que neste trabalho é adotado o modelo JMARTI (MARTI, 1988) que está disponível no software ATP/EMTP dentre vários outros modelos. A opção por esse tipo de modelo de LT está na possibilidade do mesmo ser construído utilizando os dados de linha já conhecidos. Os dados de linha foram obtidos em Anderson (1999).

Os dispositivos de manobras e simulações também estão entre os mais importantes para o projeto do modelo do sistema elétrico de potência, pois sem eles as simulações não podem ser realizadas da forma desejada. Disjuntores e chaves são utilizados de diversas formas e com objetivos variados. Chaves controladas e fixadas para controlar o transformador permitem a simulação de faltas internas entre enrolamentos ou entre enrolamentos e a terra além de se realizar mudanças de *tap* da máquina elétrica e a observação de diversos comportamentos. As chaves posicionadas internamente ao transformador são modificações feitas nos modelos originalmente disponíveis no ATPDraw. Já as chaves e disjuntores fixados externamente ao transformador estão em algumas posições estratégicas do circuito e permitem simulações de energização do conjunto, aplicação de carga como também simular faltas externas ao transformador para que seja possível observar seus efeitos.

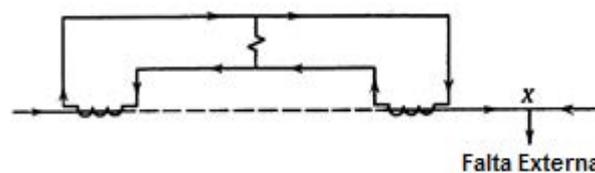
Na barra final do sistema tem-se uma carga conectada ao terminal receptor da linha de transmissão. O modelo das cargas também é simples, pois é representada por uma impedância indutiva. O modelo do ATPDraw permite fixar valores de resistência, indutância e potência.

#### 4.1.2 Transformadores de corrente (TCs) aplicados à proteção diferencial

Um componente que exige muita atenção no projeto de proteção diferencial é o transformador de corrente, já que esse componente é indispensável no projeto deste tipo de proteção e se mal projetado pode apresentar erros de medição na corrente diferencial. Os principais erros que envolvem os projetos dos transformadores de corrente estão na escolha errada da relação de transformação dos TCs que se relacionam diretamente com a relação de transformação dos transformadores de potência, a defasagem angular entre as correntes nos enrolamentos em conexões  $\Delta$ -Y, a sobreexcitação, além da possibilidade de saturação dos TCs.

Na Figura 17 a linha pontilhada representa o elemento ou seção do circuito elétrico que é protegido pelo relé diferencial, neste caso o transformador de potência. Um transformador de corrente deve compor cada terminal do transformador protegido. Os secundários dos TCs são interconectados. Considerando que a corrente flui através do circuito do lado primário para o secundário, quando se tem uma falta ou curto-circuito no ponto indicado por “x” então as condições observadas são como as da Figura 17. Se os dois transformadores de corrente estiverem corretamente conectados, as correntes nos seus secundários irão circular entre os dois TCs e nenhuma corrente flui através do relé diferencial.

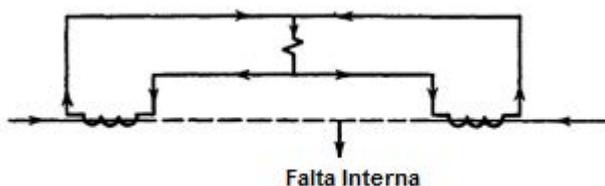
Figura 17 - Correntes Através dos TCs – Condições para Faltas Externas.



Fonte: Mason (1956).

Se um curto-circuito acontecer em algum ponto entre os TCs as condições observadas serão como as da Figura 18. Se a corrente flui até o curto-circuito em ambos os lados primário e secundário, como ilustrado, a soma das correntes no lado secundário dos TCs irá fluir através do relé diferencial.

Figura 18 - Correntes Através dos TCs – Condições para Falta Internas.



Fonte: Mason (1956).

Não é necessário que uma corrente de curto-circuito flua por ambos os lados do conjunto para existir corrente pelo relé diferencial. Um fluxo por apenas um dos lados do conjunto ou mesmo a detecção de correntes com amplitudes diferentes em cada extremidade é suficiente para ser a causa do aparecimento de uma corrente diferencial. A corrente diferencial obtida pela correta ligação dos transformadores de corrente é então proporcional à corrente entrando e saindo do sistema de proteção (MASON, 1956).

Transformadores de potência ligados em sistemas elétricos na configuração do tipo estrela-triângulo apresentam defasagem angular de  $30^\circ$  entre as correntes dos lados primário e secundário do transformador (MONSEF ; LOTFIFARD, 2007) e a opção comumente utilizada para se corrigir tal defasagem é a ligação dos TCs de forma contrária ao enrolamento do transformador de potência. Especificamente para este trabalho, a correção dos erros de defasagem angular para as conexões  $\Delta$ -Y poderia ser realizadas de duas formas. Uma das opções seria a apresentada anteriormente, muito aplicada aos relés eletromecânicos, mas a proteção diferencial numérica utiliza a modificação matricial diretamente via *software*, onde se realiza a compensação da defasagem via algoritmo e modelos digitais dos TCs, essa é a opção adotada neste trabalho. A compensação da defasagem é aplicável ao lado delta do transformador de potência, ou seja, o enrolamento primário e trabalha com as correntes das fases A, B e C utilizando a equação matricial (21) (ANDERSON, 1999).

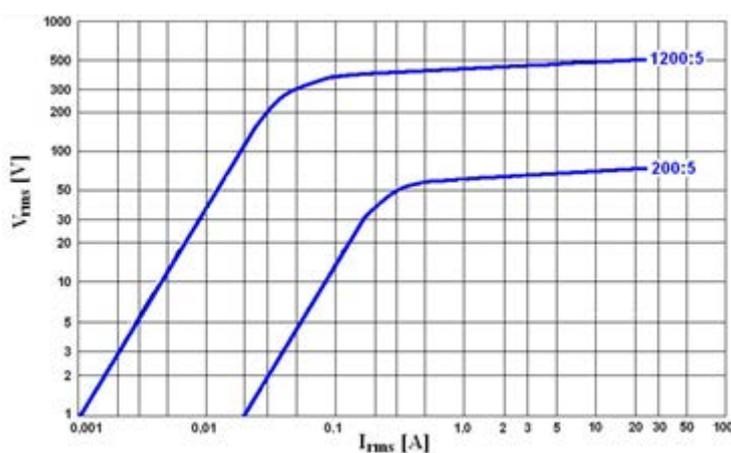
$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{-1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I'_A \\ I'_B \\ I'_C \end{bmatrix} \quad (21)$$

Evitar a saturação dos TCs é uma técnica realizada em conjunto com a escolha das relações de transformação dos transformadores de corrente nos lados primário e secundário, pois nesta etapa deve-se atentar também para a característica de classe de precisão do transformador de corrente. Classes de precisão de TCs de medição representam a sensibilidade do equipamento e qual é o erro de amplitude na medição dos sinais. Diversas normas e diretrizes apresentam os limites máximos para tais amplitudes e as classes de precisão são de três categorias, classe 1,2, classe 0,6 e classe 0,3 onde é claro, quanto menor a classe mais caro é o TC de medição.

As características nominais de interrupção de correntes elevadas e as características nominais de precisão dos TCs afetam o desempenho dos relés de proteção. Isto é evidente nos valores nominais padronizados de classe de precisão relacionados à Norma IEEE C37.20.2 (1999). É possível que poucos engenheiros de sistemas de potência possam visualizar as formas de onda de correntes saturadas causadas por elevadas correntes de falta ou como elas são processadas nos modernos relés de proteção e as consequências de valores nominais de classe de precisão baixos (ZOCHOLL, 2004).

Neste trabalho alguns TCs de medição são testados durante a fase de projeto e modelagem dos componentes com o objetivo de se evitar a saturação no núcleo. Os TCs que melhor se comportaram foram os encontrados na referência IEEE Std C57.13 (1993). Para as medições no enrolamento de alta tensão do transformador de potência o TC deve ter relação de transformação 1200:5 e para o enrolamento de média tensão é escolhido um TC com relação de transformação 200:5. A seguir, na Figura 19, estão fixadas as curvas de saturação de cada um desses tipos de transformadores de corrente.

Figura 19 - Curvas de Saturação Características dos TCs de Medição.



Fonte: IEEE Std C57 (1993).

Escolhidas as relações de transformação dos transformadores de corrente a atenção da metodologia retorna para as suas classes de precisão. De acordo com a norma IEEE C57.13 (1993) o TC com relação de transformação 1200:5 utilizado no lado de alta tensão deve ter classe de precisão 0,3 bem como o TC utilizado no lado de média tensão deve ter classe de precisão 0,6. Para efeitos de ilustração, um transformador de corrente com classe de precisão tipo 0,6 apresenta erro de precisão ( $e$ ) na amplitude de suas medições na faixa de  $0,994 \leq e \leq 1,006$  e o projeto do transformador de corrente para o relé digital diferencial deve considerar as classes de precisão para não entrar em desacordo com as normas.

Neste trabalho, consideram-se as adequações para as classes de precisão dos TCs como parte

integrante dos *elementos de projeto* dos equipamentos de medição do sistema de proteção e não sendo parte direta dos *elementos de simulação*, por isso não são apresentadas nas características gerais do algoritmo do relé diferencial. Do mesmo modo que é possível adicionar as características de curva de magnetização dos transformadores, também é possível obter um transformador de corrente que respeite os limites de erros de medição propostos pelas normas de classe de precisão, e para tal realizam-se as modificações no modelo disponível em ATPDraw com a edição do seu arquivo “.LIS” e associação com os arquivos “.ATP” do projeto com modelos do ATP/EMTP que possibilitam subrotinas secundárias que não permitam um equipamento de medição que não atenda as especificações. Os TCs, bem como outros *elementos de projeto* foram previamente testados para alguns casos a fim de se determinar se funcionariam corretamente para serem considerados como equipamentos de medição confiáveis e só posteriormente são aplicados nas análises como parte integrante do circuito digital de proteção diferencial. Nas próximas seções apresentam-se diversas outras características da metodologia proposta neste trabalho, já que até aqui foi dado enfoque à modelagem do sistema elétrico de potência e seus componentes. Detalhes sobre a aquisição e tratamento de sinais e as utilizações da transformada *wavelet* também são importantes e demonstram como são utilizadas as ferramentas matemáticas e introduzem as técnicas de programação especificamente para a diferenciação entre as correntes de falta e correntes de *inrush* no algoritmo proposto.

## 4.2 Aquisição e tratamento de sinais

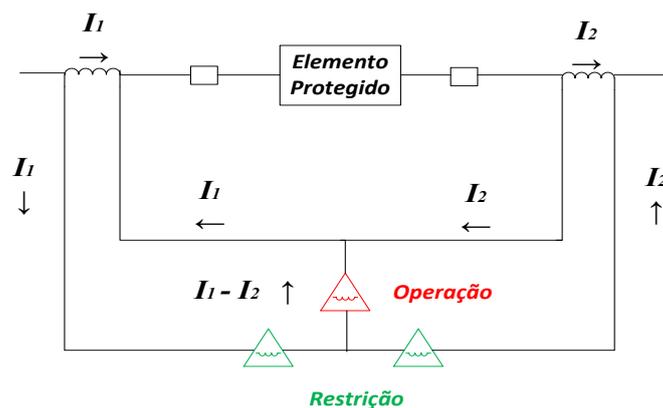
Independentemente da técnica de proteção utilizada bem como quais ferramentas físicas ou matemáticas são consideradas para proteger a máquina elétrica, um projeto de proteção diferencial deve considerar um componente indispensável, o relé diferencial.

Neste trabalho o relé diferencial é o componente de tomada de decisão do sistema de proteção, sendo responsável pelo disparo do sinal de restrição ou *tripping* quando da detecção de um distúrbio no transformador. Neste caso, a corrente de magnetização não deve ser responsável pelo *tripping*, atuação que somente deve acontecer quando se detecta uma falta fase-terra, faltas entre fases ou uma falta trifásica, todas caracterizadas como distúrbios no transformador protegido.

Um tipo de relé diferencial muito conhecido é o relé diferencial de sobrecorrente cujo funcionamento obedece às predefinições de um sinal de limiar, também conhecido como *threshold*. Uma vez fixado um limite para a operação do relé diferencial de sobrecorrente, qualquer sinal detectado acima do limite ou *threshold* é considerado como acima das condições nominais da máquina elétrica e então o relé deve atuar. Tal metodologia é raramente utilizada atualmente na proteção de transformadores e até mesmo considerada ultrapassada, mas serve de base para o entendimento da operação dos relés digitais quando porções do sinal são analisadas a cada nova amostra refletindo no comportamento do sinal de operação do relé diferencial.

Um tipo de relé muito utilizado e que também é o tipo proposto neste trabalho é o relé diferencial percentual. Este é essencialmente o mesmo que o relé de sobrecorrente com respeito ao balanço de corrente que foi descrito anteriormente, mas é conectado em um circuito diferente, como mostrado na Figura 20. A corrente diferencial necessária para causar a atuação do relé diferencial percentual é um valor variável (MASON, 1956).

Figura 20 - Característica Operacional do Relé Diferencial Percentual.



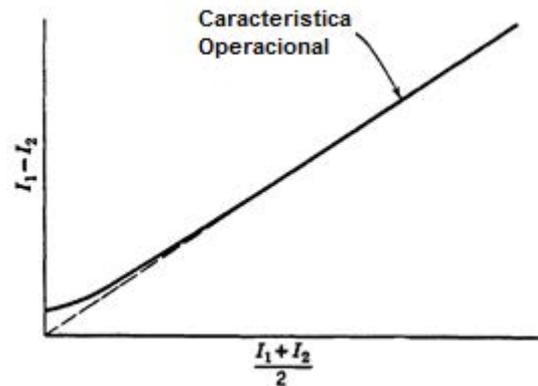
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Desenvolve-se então um relé com dois tipos de enrolamentos, chamados *enrolamento de operação* e *enrolamento de restrição*. Correntes no enrolamento de operação tendem a causar *tripping* ou a atuação da proteção e são proporcionais a  $I_1 - I_2$ , ao passo que as correntes no enrolamento de restrição evitam o *tripping* e são proporcionais a  $(I_1 + I_2)/2$ . Dessa forma, uma pequena corrente diferencial é tolerada sem que o relé atue.

Com este arranjo, a corrente necessária para sensibilizar o relé cresce à medida que a corrente de falta também cresce. Geralmente, relés diferenciais percentuais são desenvolvidos para atuarem para valores em torno de 10% a 40%, que expressam o desbalanceamento na corrente necessária para sensibilizar o relé, expressa em termos da menor corrente necessária para a atuação da proteção (ANDERSON, 1999).

Na Figura 21 ilustra-se o princípio de funcionamento do relé diferencial percentual e sua característica operacional.

Figura 21 - Característica Operacional do Relé Diferencial Percentual.



Fonte: Mason (1956).

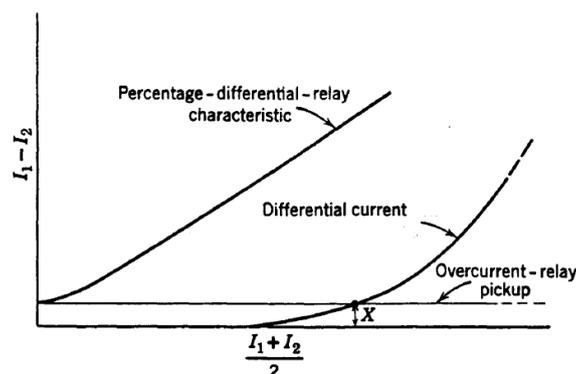
As equações (22) e (23) apresentam um resumo das correntes diferenciais como relação das correntes nos enrolamentos primário e secundário do transformador de potência, onde  $K$  é a inclinação da curva, ou a característica operacional do relé diferencial percentual.

$$I_d = I_1 - I_2 \quad (22)$$

$$I_d \geq K \cdot (I_1 + I_2)/2 \quad (23)$$

Utilizar o relé diferencial percentual traz grandes vantagens com relação ao relé diferencial de sobrecorrente. Relés diferenciais percentuais estão menos sujeitos a operar incorretamente quando um curto-circuito ocorre fora da zona de proteção pois como o relé diferencial percentual tem a característica de variar o seu valor de limiar ou *pickup* conforme o nível de corrente de falta aumenta, então não são esperadas operações indevidas da proteção do componente protegido. Na Figura 22 apresenta-se uma comparação entre o relé diferencial de sobrecorrente e o relé diferencial percentual. Nesta Figura, um relé diferencial de sobrecorrente apresentando o mesmo valor mínimo de *pickup* que um relé diferencial percentual deve operar de forma indesejada quando a corrente diferencial simplesmente exceder o valor “X” ao passo que tal resposta não será apresentada pelo relé diferencial percentual (MASON, 1956).

Figura 22 - Comparativo de Resposta à Corrente Diferencial – Relé Diferencial Percentual e Relé de Sobrecorrente.



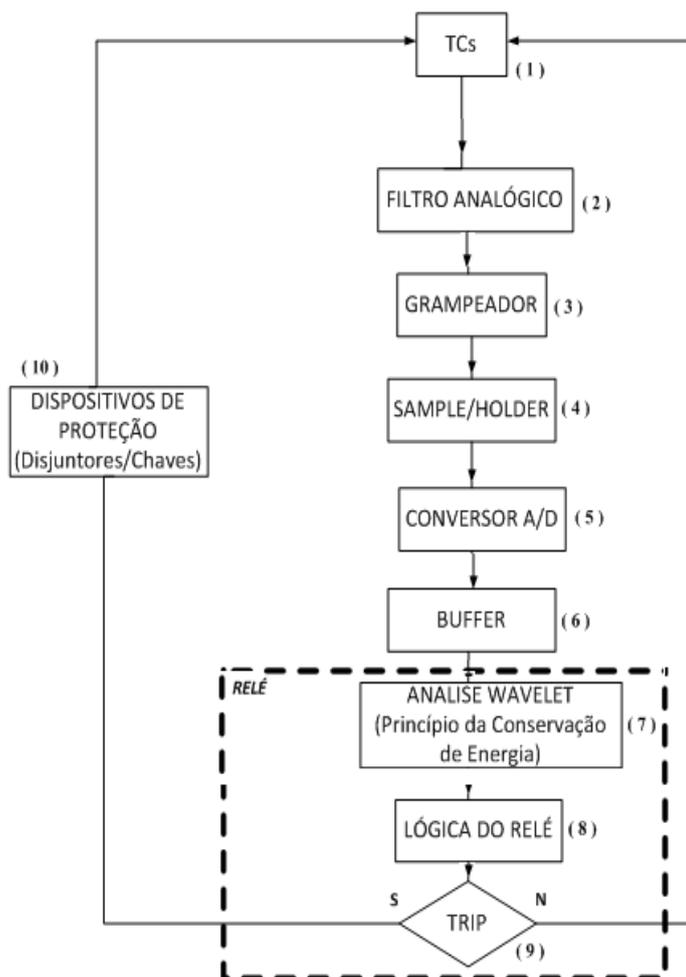
Fonte: Mason (1956).

A utilização do relé diferencial percentual na proteção contra curtos-circuitos em transformadores de potência é altamente recomendada para as unidades com potência a partir de 1000 KVA. Estudos de um grande número de companhias energéticas também já apresentaram grande opção pela técnica com preferência quase que unânime principalmente quando se utilizam unidades transformadoras de potência maiores que 5000 KVA (MASON, 1956).

Neste trabalho, outros detalhes sobre a utilização do relé diferencial percentual como escolha para se realizar a proteção de transformadores de potência são apresentados no decorrer da exposição da metodologia. Com base nos conceitos até aqui apresentados, a próxima etapa da metodologia é o desenvolvimento do relé diferencial digital.

No contexto da proteção digital existem diversas técnicas e procedimentos a serem seguidos para que seja possível implementar o algoritmo de um relé numérico. A diferença entre as técnicas são a eficiência e velocidade de atuação do dispositivo, mas os relés numéricos convencionais são compostos por uma estrutura característica básica. Na Figura 23 está ilustrado o diagrama de blocos do relé numérico implementado nesse trabalho. A partir do sistema elétrico de potência sob análise modela-se o relé numérico para utilizar os resultados de simulações dos transitórios no transformador no *software* ATP/EMTP.

Figura 23 - Diagrama de blocos - Componentes do Relé Numérico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os *TCs* condicionam as amplitudes de correntes para os níveis compatíveis com os circuitos do relé numérico.

O *Filtro Analógico* tem a função de permitir que se trabalhe com as componentes de frequência adequadas do sinal sob análise, respeitando as técnicas de processamento digital de sinais ao se utilizar um filtro *anti-aliasing* adequado. Em *software* MATLAB, um filtro *Butterworth* de 2ª ordem é utilizado para realizar esta função.

O circuito *grameador* também é um componente projetado digitalmente para o algoritmo. É um bloco de condicionamento de sinal. Adequa as tensões para os valores de operação do relé digital. As tensões dos relés digitais são fixadas em -10V e +10V, adequando-se aos valores práticos encontrados para esses equipamentos de proteção.

O circuito *Sample/Holder* tem a função básica de capturar o sinal da amostra atual e mantê-lo constante por um intervalo de tempo. É implementado no *software* MATLAB e deve aguardar o algoritmo analisar a informação apresentada pela amostra atual antes de passar para a próxima amostra apresentando a característica de conversão analógica/digital (A/D).

O bloco para o *Conversor A/D* utiliza o sinal capturado pelo circuito *sample/holder* e realiza a conversão do sinal analógico para digital, ou seja, converte o sinal para uma sequência de bits.

O *Buffer* é o bloco responsável pelo armazenamento das amostras que são utilizadas na lógica do relé digital. Valores de taxa de amostragem em amostras/ciclo ou milissegundos são definidos para uma melhor qualidade na obtenção de dados do circuito e informações necessárias para o algoritmo responsável pelas características do relé digital.

O bloco de *Análise do sinal através da transformada wavelet* representa o uso dos recursos da transformada *wavelet* na análise dos sinais. Utiliza-se o princípio da conservação de energia para diferenciar faltas internas de corrente de *inrush*. A *wavelet* mãe utilizada foi a Daubechies (db) pela sua performance, opções de aplicações e estar consolidada para a realização de análise de sinais em sistemas elétricos de potência. A família de *wavelets* Daubechies é uma boa escolha para a maioria das situações encontradas em sistemas elétricos de potência já que são geralmente melhores para identificar eventos com rápidas oscilações além de fenômenos transitórios, características típicas desses eventos (COURY, 2013). A *wavelet* mãe db4 é escolhida por seus coeficientes serem suficientes para realizar a análise com o foco na conservação de energia.

Para finalizar o tratamento de sinais, o bloco com a *lógica do Relé* é onde está definida como a proteção deve atuar no caso da detecção de uma falta no transformador de potência, neste caso, a proteção não deve atuar para condições onde se observa a presença da corrente de magnetização. Uma sequência de comandos também em *software* MATLAB aplica os conceitos da transformada *wavelet* associados às suas principais propriedades apresentadas. É nesse bloco onde está implementado o algoritmo de proteção diferencial proposto.

Durante as simulações tem-se a associação de dados simulados em *software* ATP/EMTP com o tratamento dos sinais simulados utilizando o *software* MATLAB.

#### 4.3 O algoritmo proposto

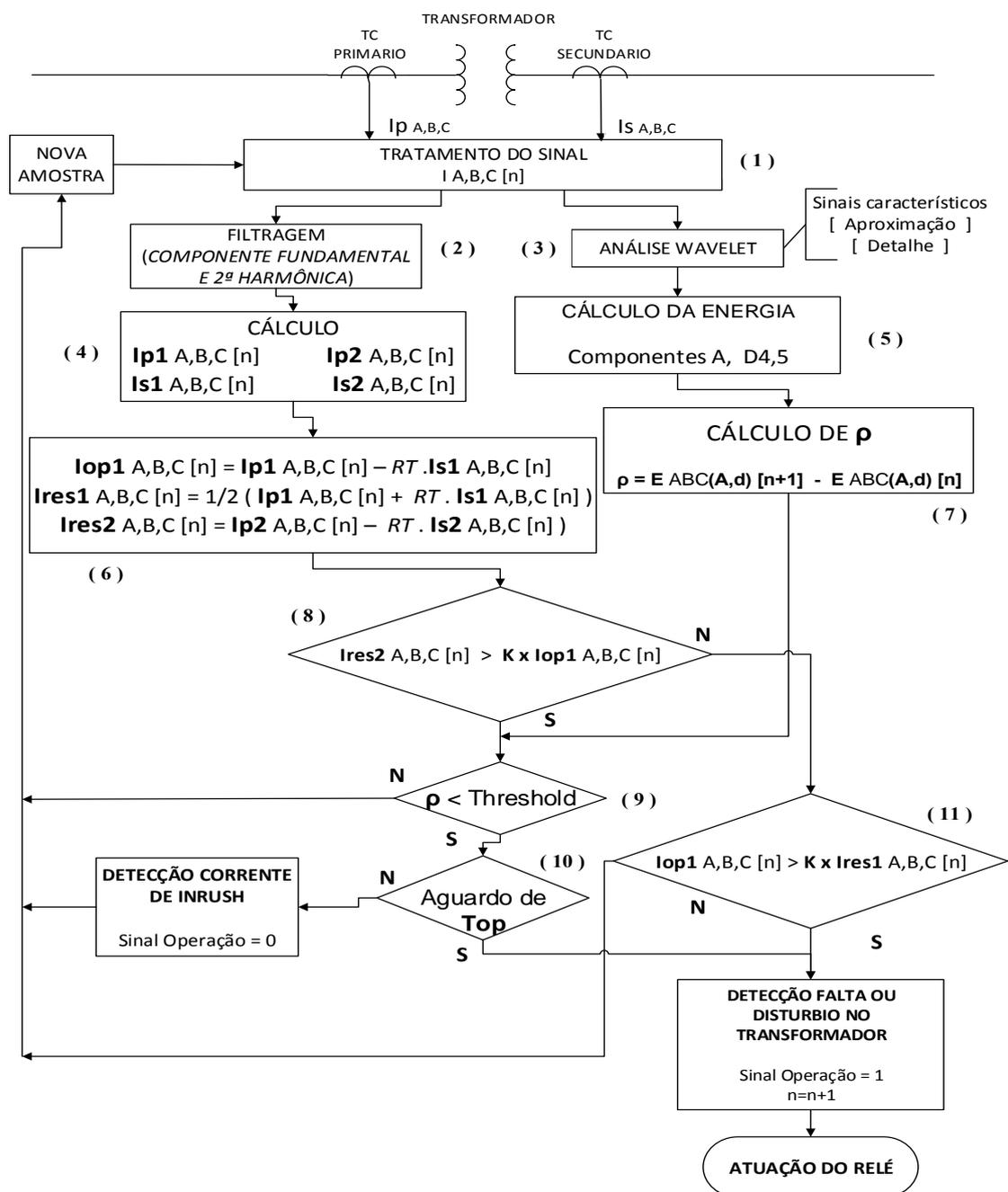
O algoritmo do relé foi implementado no *software* MATLAB. A cada janela de tempo são amostradas as grandezas de interesse, que são as correntes em cada fase, nos lados primário e secundário do transformador de potência. As correntes diferenciais do transformador são obtidas através das equações (3) para as fases A, B e C, respectivamente. Com a obtenção das correntes medidas pelos TCs nos lados

primário e secundário o algoritmo inicia a busca pela discriminação entre correntes de magnetização ou correntes de falta.

O sinal de operação é responsável por chavear o sistema de proteção apenas quando as correntes de falta forem detectadas, não podendo atuar na magnetização do transformador, seja essa magnetização realizada com ou sem carga no secundário do transformador.

Na Figura 24 apresenta-se o diagrama de blocos do relé diferencial proposto. O algoritmo de proteção diferencial numérico é inicializado através de amostras do sinal de correntes do primário e secundário do transformador. A amostragem é uma etapa importante do processamento digital de sinais. Uma amostra adequada deve conter as informações necessárias para realizar a análise do sinal através de filtros *anti-aliasing*, bem como a frequência de amostragem que permite obter um sinal que ofereça todas as informações necessárias para o projeto do relé.

Figura 24 - Algoritmo Numérico de Proteção Diferencial Proposto.



$\rho$ : Define a mudança na característica energética das componentes de aproximação e detalhe

**Top**: Tempo para aguardar uma possível mudança na característica da energia do sinal.

$I_{p1} A,B,C [n]$  e  $I_{p2} A,B,C [n]$ : Correntes no lado primário (1ª e 2ª Harmônica)

$I_{s1} A,B,C [n]$  e  $I_{s2} A,B,C [n]$ : Correntes no lado secundário (1ª e 2ª Harmônica)

**K**: Constante de restrição (Percentual da Corrente fundamental)

**RT**: Relação de transformação

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

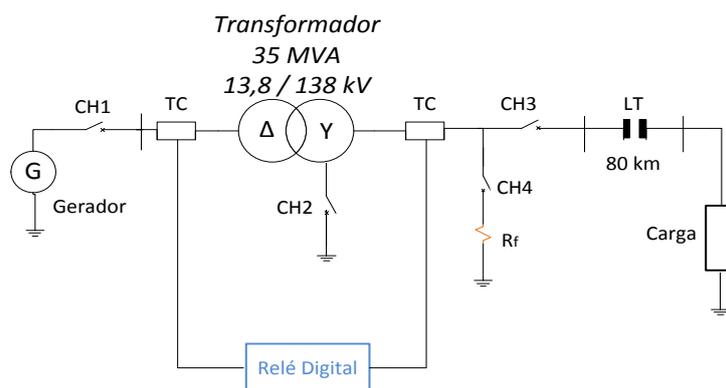
A partir da realização da amostragem dos sinais (blocos 1-6 da Figura 23), no algoritmo do relé da Figura 24, divide-se a análise do sinal em duas condições. Na primeira condição (blocos 2 e 4) obtêm-se as componentes harmônicas das correntes de primeira e segunda ordem. O filtro *Butterworth* de 2ª ordem é utilizado para tal finalidade. A frequência de corte considerada adequada é fixada em 1935 Hz. A aplicação da técnica de proteção diferencial percentual permite obter os valores das correntes nos enrolamentos de operação e restrição do relé. O bloco (2) representa a etapa de filtragem para o posterior cálculo das equações características do relé nos blocos (4) e (6). Na segunda condição a amostra atual é analisada através da transformada *wavelet*. Nos blocos (3) e (5) calcula-se a transformada *wavelet* e a energia do sinal para auxiliar na detecção de harmônicos e diferenciar corrente de magnetização de correntes de faltas. Nestes blocos calculam-se os coeficientes de aproximação que contêm as características da componente fundamental e os coeficientes de detalhe  $d_4$  e  $d_5$  que representam as harmônicas de segunda e quinta ordens baseadas na frequência de operação do sistema elétrico de 60 Hz.

Ainda conforme a Figura 24, no bloco (7), a partir da análise *wavelet*, utiliza-se o conteúdo de energia das componentes de aproximação e detalhe das correntes diferenciais de cada fase. No bloco (8) define-se se existe ou não a presença de harmônica de segunda ordem e caso não exista vai-se para o bloco (11) para detectar a falta ou distúrbio no equipamento. Nos blocos (9) e (10) estão representadas as tomadas de decisões do relé, pois o coeficiente  $\rho$  representa as mudanças no espectro de energia dos sinais de corrente de uma amostra atual  $n$  com relação a uma amostra  $h$ , que cobre uma janela de meio ciclo do sinal analisado. Se  $\rho$  é menor que um valor de limiar existe a indicação de que existe uma mudança no espectro de energia dos sinais *wavelet*. Correntes de *inrush* são apresentadas na componente de detalhe como oscilações de altas frequências e pequenas magnitudes, já correntes de faltas apresentam oscilações de altas frequências e maiores magnitudes, e apresentam duração muito curta. No caso de condições de corrente de *inrush*, o coeficiente  $\rho$  apresenta característica oscilatória, ao passo que na presença de faltas essa característica se perde após um determinado tempo. O bloco (10) representa um *delay* de tempo em que verifica se tais características são observadas por um tempo de operação preestabelecido ( $T_{OP}$ ) para decidir se deve atuar a proteção do transformador. O tempo de operação aguardado é fixado como meio ciclo.

## 5 TESTES E RESULTADOS

O sistema de energia elétrico utilizado nos testes do algoritmo numérico de proteção diferencial está ilustrado no diagrama unifilar da Figura 25.

Figura 25 - Sistema Elétrico Simulado – Transformador 35MVA.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

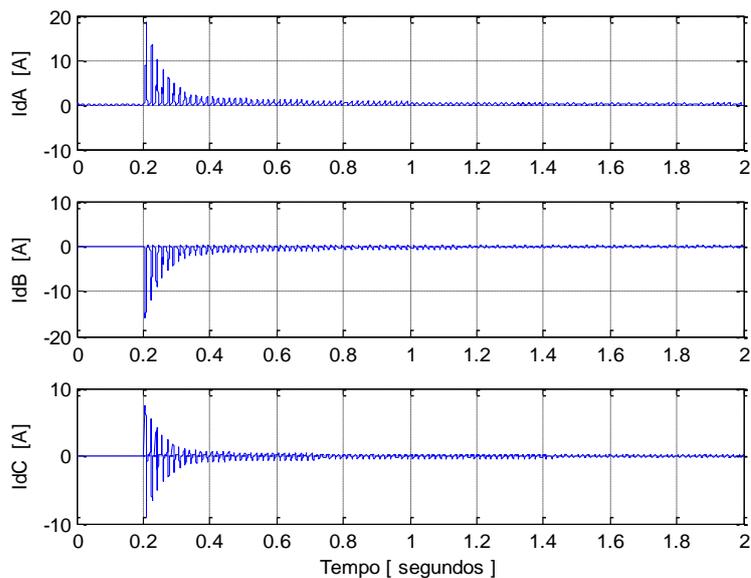
Neste sistema tem-se uma fonte de alimentação trifásica com tensão nominal de amplitude 13,8 kV, frequência 60 Hz e ângulo de chaveamento de  $0^\circ$ . Com esse valor de ângulo de chaveamento existe uma defasagem de  $120^\circ$  entre as correntes no transformador para cada fase, então as correntes de magnetização apresentam como característica a propriedade de terem valores de mesma amplitude, porém com sinais opostos.

O transformador de potência trifásico possui dois enrolamentos (35MVA, DY 13,8/138 kV) com o lado estrela aterrado, e foi modelado no software ATPDraw. No ATP são configuradas diversas de suas características, como curva de saturação, impedâncias dos enrolamentos primário e secundário, resistência de magnetização e tensões em seus terminais primário e secundário. O modelo permite a simulação de faltas internas como curtos-circuitos fase-terra e entre fases, bem como o monitoramento do processo de energização do transformador para observar as características da corrente de *inrush* e faltas externas. A linha de transmissão é de 138 kV com comprimento de 80 km e uma carga trifásica conectada ao final do conjunto de 10 MVA, fator de potência 0,92 indutivo.

As chaves CH1, CH2 e CH3 permitem simular as manobras de energização do conjunto, aplicação de faltas internas ao transformador e adição ou retirada da carga trifásica. A chave CH4 permite simular a aplicação de faltas externas através de uma resistência de falta  $R_f=10\Omega$  com o objetivo de validar a funcionalidade da proteção diferencial para este tipo de falta.

Para a simulação da energização do transformador sem a presença de carga no seu secundário, ou seja, no primeiro momento, consideram-se que as chaves CH1, CH2, CH3 e CH4 do circuito descrito na Figura 26 estão todas abertas, mas a energização acontece no instante 0,2s, quando a chave CH1 é fechada. Na Figura 26 apresentam-se as correntes diferenciais medidas quando ocorre a energização do transformador.

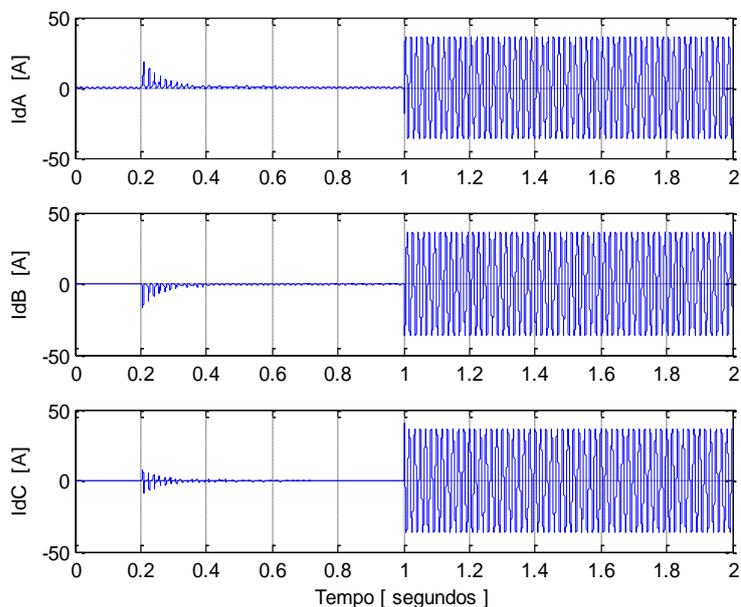
Figura 26 - Correntes Diferenciais de Magnetização nas Três Fases do Transformador.



Fonte: Resultados de simulações.

Na Figura 27 estão representadas as formas de ondas das correntes diferenciais após a aplicação da carga no sistema, ou seja, com o fechamento da chave CH3 no instante 1 segundo.

Figura 27 - Correntes Diferenciais com Aplicação da Carga no Transformador.

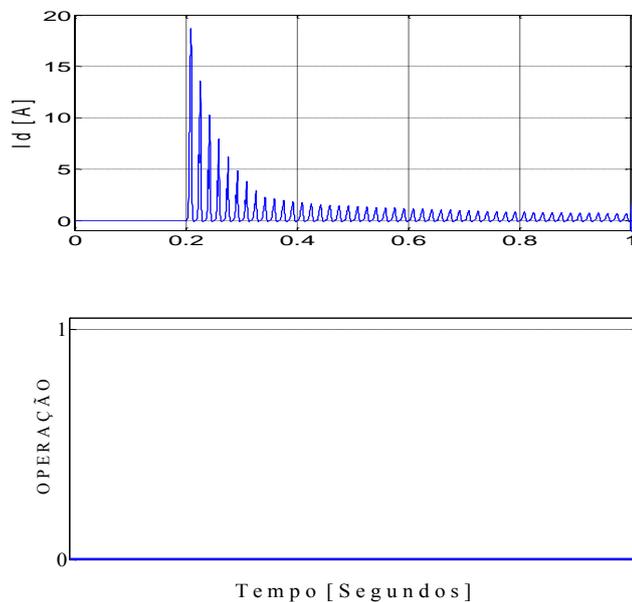


Fonte: Resultados de simulações.

Nas Figuras 28 e 29 apresentam-se as formas de onda para a aplicação de uma falta fase-terra e o estado do sinal de *tripping* do relé diferencial. Falta interna são aplicadas no transformador quando é

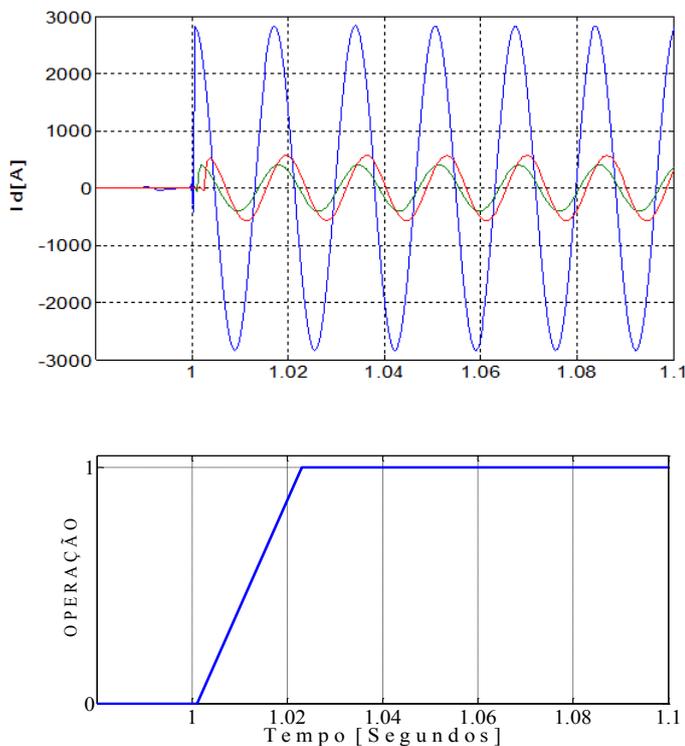
fechada a chave CH2 da Figura 25. Neste caso tem-se a aplicação de falta fase-terra na fase A do transformador de potência no tempo de 1,0 segundo. Observa-se como o sinal de operação acompanha a simulação e muda de estado para indicar que uma falta está ocorrendo no transformador.

Figura 28 - Simulação de Falta Fase-Terra e Sinal de Operação do Relé Diferencial.



Fonte: Resultados de simulações.

Figura 29 - Simulação de Falta Fase-Terra e Sinal de Operação do Relé Diferencial (*Tripping*).



Fonte: Resultados de simulações.

Para mostrar a eficiência do algoritmo quanto a diversos tipos de faltas externas e internas são aplicadas no transformador e apresentam-se a eficiência de cada detecção de falta bem como as quantidades de manobras realizadas.

Foram simuladas 150 faltas internas fase-terra, faltas bifásicas, faltas bifásicas a terra, faltas trifásicas e faltas trifásicas a terra e o relé diferencial percentual proposto atuou corretamente em 100% desses eventos.

Para analisar a eficiência do relé para correntes de *inrush* foram simulados 33 experimentos e para ocorrência de faltas externas foram realizados 45 experimentos e a proteção diferencial permaneceu sem atuar para 100% de todos os eventos.

O modelo de relé numérico proposto é rápido o suficiente para detectar faltas ou distúrbios que podem danificar o transformador. De acordo com a norma referente aos procedimentos de rede e proteção de transformadores cujo mais alto nível de tensão nominal é inferior a 345 kV (ANEEL/ONS, 2011), o transformador deve dispor de três conjuntos independentes de proteção e o tempo total de eliminação de faltas e contando o tempo de operação do relé de proteção, relés auxiliares e abertura dos disjuntores do transformador, não deve exceder 150ms. O tempo para a atuação do relé para este caso é em torno de 22 ms e está dentro dos padrões de normas para proteção de transformadores, mostrando que este algoritmo pode ser implementado e apresentar resultados satisfatórios em sistemas reais. O algoritmo desenvolvido se mostrou eficiente, apresentando uma porcentagem de acertos muito boa comparado com outras referências (POTHISARN et.al, 2012), apresentando em todas as configurações de falta, porcentagem de acertos ou atuação correta do relé em 100% dos eventos, permanecendo na mesma faixa de eficiência de estudos atuais.

Ensaio adicionais são realizados apresentando outras características do sistema elétrico de potência com o objetivo de detectar possíveis influências deste que sejam capazes de prejudicar o funcionamento do relé diferencial projetado bem como diminuir a eficiência nas detecções corretas de faltas ou distúrbios no sistema elétrico e a velocidade do algoritmo.

Realiza-se outro conjunto de testes, desta vez utilizando-se valores diferentes de carregamentos ao final do conjunto apresentado na Figura 25. Utilizam-se os carregamentos com valores de 4MVA, denominado *carregamento leve* e 20MVA, denominado *carregamento pesado*. Pode ser observado pela Tabela 2 que o carregamento leve não influencia nas detecções de faltas pelo relé numérico projetado e baseado na proteção diferencial percentual, bem como a Tabela 3 ilustra que os resultados também se mantêm como esperados para os casos de faltas externas ou detecção de correntes de *inrush*, ou seja, a proteção não atua.

Tabela 2 - Eficiência do Algoritmo (*Proteção atuando*)*Carregamento Leve: 4MVA.*

<i>OCORRÊNCIA</i> <i>(faltas internas)</i>	<i>Quantidade de</i> <i>manobras</i>	<i>Acertos</i> <i>(%)</i>
Falta Fase A,B,C – Terra	60	100
Falta Bifásica AB, AC, BC	60	100
Falta Bifásica – Terra	60	100
Falta Trifásica ABC	60	100
Falta Trifásica – Terra	60	100

Fonte: Resultados de simulações.

Tabela 3 - Eficiência do algoritmo (*Proteção não atuando*).*Carregamento Leve: 4MVA.*

<i>OCORRÊNCIA</i>	<i>Quantidade</i> <i>manobras</i>	<i>Acertos</i> <i>(%)</i>
Corrente <i>Inrush</i>	35	100
Falta Externa	50	100

Fonte: Resultados de simulações.

Finalizando o conjunto de ensaios para o transformador de potência de 35 MVA têm-se as respostas do relé numérico projetado que também não apresenta resultados diferentes dos anteriores, muito menos mudança na eficiência na detecção de correntes de *inrush* ou faltas internas ou externas ao conjunto. Nas Tabelas 4 e 5 estão apresentados os resultados.

Tanto para carregamento leve ou pesado o algoritmo apresentou a mesma velocidade de 22 ms para o tempo de detecção de distúrbios no transformador de potência. Pode-se considerar então, que o carregamento não é um fator que influencia o sistema de proteção aqui desenvolvido.

Tabela 4 - Eficiência do Algoritmo (*Proteção atuando*).*Carregamento Pesado: 20MVA*

<i>OCORRÊNCIA</i> <i>(faltas internas)</i>	<i>Quantidade de</i> <i>manobras</i>	<i>Acertos</i> <i>(%)</i>
Falta Fase A,B,C – Terra	60	100
Falta Bifásica AB, AC, BC	60	100
Falta Bifásica – Terra	60	100
Falta Trifásica ABC	60	100
Falta Trifásica – Terra	60	100

Fonte: Resultados de simulações.

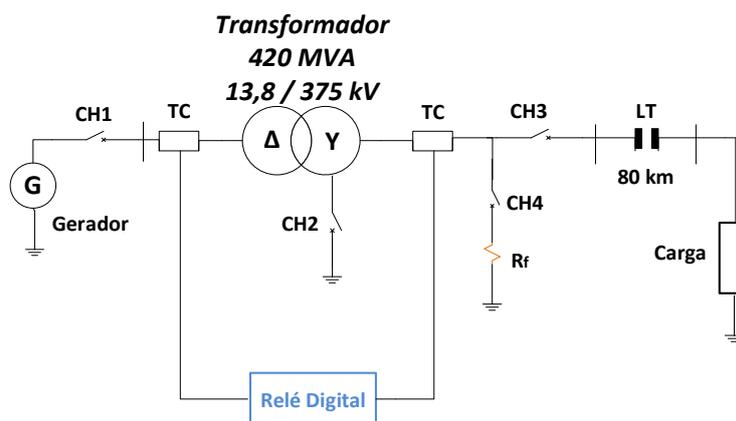
Tabela 5 - Eficiência do algoritmo (*Proteção não atuando*).*Carregamento Pesado: 20MVA.*

<i>OCORRÊNCIA</i>	<i>Quantidade</i> <i>manobras</i>	<i>Acertos</i> <i>(%)</i>
<i>Corrente Inrush</i>	35	100
Falta Externa	50	100

Fonte: Resultados de simulações.

Para fins de comparação de resultados é escolhido um transformador trifásico com dois enrolamentos com potência maior de modo a investigar as influências da potência do transformador no comportamento do rele diferencial percentual. O circuito de potência é modificado para o correspondente a Figura 30.

Figura 30 - Sistema Elétrico Simulado – Transformador 420 MVA.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com os níveis de tensão adotados para esse caso, o projeto de proteção do transformador deve considerar que ocorre uma mudança nas exigências para o circuito de potência apresentado. A norma referente aos procedimentos de rede e proteção de transformadores cujo mais alto nível de tensão nominal é igual ou superior a 345 kV exige que o tempo total de eliminação de faltas, contando o tempo de operação do relé de proteção, relés auxiliares e abertura dos disjuntores do transformador, não deva exceder 120ms. Assim como no transformador de menor potência, neste caso também é exigido que as funções diferenciais percentuais atuem individualmente por fase apresentando características de detecção de correntes de magnetização bem como as funções para detecção de faltas internas no transformador de potência devem comandar a abertura e bloqueio de todos os disjuntores do transformador, isolando rapidamente o conjunto (ANEEL/ONS, 2011).

Detalhes das configurações do transformador de potência utilizado no *software* ATP/EMTP a partir da ferramenta ATPDraw estão apresentados em anexos.

Assim como no primeiro caso apresentado neste capítulo, o relé numérico apresentou resultados satisfatórios para os casos de simulações de faltas internas ao transformador já que se realiza a mesma quantidade de eventos com 150 simulações de faltas fase-terra, faltas bifásicas, faltas bifásicas a terra, faltas trifásicas e faltas trifásicas a terra e o relé atuou corretamente em 100% de tais manobras.

Do mesmo modo, a eficiência com relação à presença de correntes de *inrush* ou aplicações de faltas externas também se mantém, com o relé numérico permanecendo sem enviar sinal algum que represente atuação da proteção ou *tripping*. Também realiza-se a mesma quantidade de manobras, um total de 33 eventos para cada caso.

Neste caso o relé numérico apresenta *23 ms* de tempo característico para a detecção de algum evento sobre o transformador que possa apresentar alguma ameaça, sendo assim mais lento apesar de ainda estar

longe de ficar fora dos padrões exigidos por normas e exigências para a proteção deste tipo de máquina elétrica.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresenta-se uma proposta de projeto de proteção diferencial para transformadores de potência. A transformada *wavelet* através da análise multi-resolução e o princípio de conservação de energia se mostrou uma ferramenta robusta e eficiente para o projeto de relés diferenciais. O estudo de tais ferramentas e características da transformada *wavelet* foi muito importante para o desenvolvimento do algoritmo de proteção aplicado ao sistema de energia elétrica desenvolvido utilizando algumas particularidades dessa transformada que vem ganhando cada vez mais espaço.

O *software* ATP/EMTP se mostrou muito útil para realizar simulações utilizando cada componente do sistema elétrico de potência proposto, já que todos os componentes apresentam modelos bem definidos e que ainda poderiam ser modificados utilizando os diversos recursos disponíveis. O *software* MATLAB contém diversas bibliotecas de transformadas *wavelet* com várias opções de *wavelets* mães que podem ser utilizadas e o uso dessa transformada nesse *software* pode ser realizado de forma simples e intuitiva.

Neste trabalho apresenta-se uma proposta de projeto de proteção diferencial para transformadores de potência com base em outras encontradas na literatura (Coury *et al.*, 2013) e (Eldin e Refaey, 2011). O desenvolvimento de um relé diferencial numérico foi baseado na proteção de máquinas elétricas utilizando o relé diferencial percentual, que foi julgado o mais recomendável para o projeto entre outras vantagens por ser muito eficiente e rápido para a aplicação na proteção de transformadores de potência.

Como resultado, se obteve um relé diferencial numérico com particularidades que unem a técnica de proteção diferencial percentual com as características da transformada *wavelet*, utilizada neste caso como proposta alternativa para a proteção diferencial de transformadores com restrição para harmônicas.

As características de restrição por harmônicos foram substituídas pela análise *wavelet* discreta que utilizou a energia das componentes de detalhe e o princípio da conservação de energia para se atingir tal objetivo. O algoritmo desenvolvido é capaz de diferenciar os eventos de ocorrência de faltas de eventos naturais de energização do transformador de potência, quando se observam correntes transitórias de maiores magnitudes, também chamadas de correntes de magnetização ou correntes de *inrush* não permitindo que esses eventos sejam confundidos pelo conjunto de proteção para não fazer atuarem dispositivos de forma indevida.

O processo de desenvolvimento do projeto foi a etapa que mais agregou conhecimentos pelas inúmeras considerações que podem ser realizadas para se obter um relé diferencial numérico mais robusto e que seja eficiente, mas que também não entre em desacordo com normas conhecidas para projetos de

proteção de transformadores de potência bem como poder apresentar uma representação adequada de um sistema elétrico de potência real para que seja possível a existência de aplicações práticas.

As preocupações com o comportamento dos transformadores de corrente perante esforços diversos é um dos focos principais do projeto da proteção diferencial, principalmente quanto à garantia de que medições adequadas estejam sendo realizadas além da preocupação com a possível saturação dos TCs. Modelos de projeto entre outras considerações buscaram garantir a confiabilidade dos transformadores de corrente.

Realizam-se diversas simulações individuais para cada um dos casos de falta propostos e de energização do transformador de potência com o objetivo de explorar alguma possível influência das mudanças de parâmetros do sistema de energia elétrica que pudessem influenciar no correto funcionamento do algoritmo projetado, mas o relé numérico desenvolvido com base nos conceitos da proteção diferencial percentual manteve o correto funcionamento do sistema de proteção do transformador de potência tanto para mudanças no carregamento do sistema quanto para o uso de um transformador trifásico com potência maior, mantendo a velocidade do algoritmo na faixa dos 22ms e não ultrapassando limites estabelecidos por normas regulamentadoras do setor elétrico.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M. **Power system protection**. New York : IEEE; Wiley-Interscience, 1999. 1307 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – NOS. **Requisitos mínimos para os sistemas de proteção – resolução normativa nº 461/11, submodulo 2.6** : resolução 2.0. Brasília, DF: ANEEL, 2011.
- BEJMERT, D.; REBIZANT, W.; SCHIEL, L. Transformer differential protection with fuzzy logic based inrush stabilization. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, v. 63, p. 51-63, 2014.
- BÍSCARO, A. A. P. **Proposta de algoritmos inteligentes para localizar faltas e monitorar a qualidade da energia em redes de distribuição de energia elétrica**. 2013. 156 f. Tese (Doutorado em Automação) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013. Disponível em: <<http://base.repositorio.unesp.br/handle/11449/100349>>. Acesso em: 26 set. 2014.
- BURRUS, C. S.; RAMESH, A. G.; GUO, H. **Introduction to wavelets and wavelet transforms: a primer**. Upper Sadle River: Prentice Hall, 1998. 268 p.
- CHIESA, N. **Power transformer modeling for inrush current calculation**. Norwegian University of Science and Tecnology. Trondheim, Norway, 2010.
- COURY, D. V.; BRANCO, H. M. G. C.; BARBOSA, D. OLESKOVICZ, M. Classification of events in power transformers using wavelet packet transform and fuzzy logic. **Journal Control Automatic Electric Systems**, New York, v. 24, n. 3, p. 300-311, 2013.
- DAUBECHIES, I. **Ten lectures of wavelets**. Philadelphia: SIAM, 1992. 369 p.
- ELDIN, A. A. H.; REFAEY; M. A. A novel algorithm for discrimination between inrush current and internal faults in power transformer differential protection based on discrete wavelet transform. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 81, n. 1, p. 19-24, 2011.
- FITZGERALD, A. E.; ARTHUR, A. E. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.
- FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas: teoria das linhas em regime permanente**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979. 588 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **Standard for metal-clad switchgear**. New York: IEE, 1999. (IEEE Std C37.20.2-1999)
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **IEEE Std C57.13-1993: requirements for instrument transformers**. New York: IEEE, 1978. (Mar.194. Revision of IEEE Std C67.13-1978).
- MASON, C. R. **The art and science of protective relaying**. New York: Wiley, 1956. 410 p.

- MARTI, L. Simulation of transient in underground cables with frequency-depended modal transformation matrices. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 3, n. 3, p. 1099-1110, 1988.
- MARTINEZ, J. A.; MORK, B. A. Transformer modeling for low – and mid- frequency transient – a review. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 1625-1632, 2005.
- MONSEF, H.; LOTFIFARD, S. Internal fault current identification based on wavelet transform in power transformer. **Electric Power System Research**, New York, v. 77, n. 12, p. 1637-1645, 2007.
- NGAOPITAKKUL, A.; KUNAKORN. Internal fault classification in transformer windings using combination of discrete wavelet transforms and back-propagation neural networks. **International Journal of Control, Automation and Systems**, New York, v. 4, n. 3, p. 365-371, 2006.
- OLIVEIRA, M. O. **Proteção diferencial de transformadores trifásicos utilizando a transformada wavelet**. 2009. Mestrado (Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <[https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/17292?locale=pt\\_BR](https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/17292?locale=pt_BR)>. Acesso em: 26 set. 2014.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-time signal processing**, 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. 870 p.
- PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. T. **Wavelet methods for time series analysis**. New York: Cambridge University Press, 2000. 594 p.
- POTHISARN, C.; JETTANASEN, C.; KLOMJIT, J.; NGAOPITAKKUL, A. Coefficient comparison technique of discrete wavelet transform for discriminating between external short circuit and internal winding fault in power transformer. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL MULTICONFERENCE OF ENGINEERS AND COMPUTER SCIENTISTS, 2012, Hong Kong. **Proceedings of the...** Hong Kong: [S.n.], 2012. V. 2., 6 p.
- SOARES, V. L. C.; REICHERT, F.; MANENTI, R. L.; ZENKER, J. L.; ROSA, L.; TEIXEIRA, A. G. Disturbances related to the effects of the energization transients of large autotransformer banks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS, 1995, Paris. **Conference of the...** Paris: [S.n.], 1995. p. 36-302.
- TANG, Y. Y.; YANG, L. H.; LIU, J.; MA, H. **Wavelet theory and its application to pattern recognition**. Singapore: World Scientific, 2000. 360 p.
- UNGRAD, H. **Protection techniques in electrical energy systems**. New York: M. Dekker, 1995. 387 p.
- ZENDEHDEL M. H.; SANAYE-PASAND, M. Development of two indices based on discrete wavelet transform for transformer differential protection. **European Transactions on Electrical Power**, New York, v. 22, n. 8, p. 1078-1092, 2011.
- ZOCHHOLL, S. E. Impact of high fault current and ct rating limits on overcurrent protection. In: ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE, 29, 2002, Spokane. **Conference of the...** Spokane: [S.n.], 2002. Disponível em: < Impact of high fault current and ct rating limits on overcurrent protection>. Acesso em: 26 set. 2014.

## ANEXO A

A seguir são apresentados os parâmetros e configurações utilizados no *software* ATP/EMTP com a ferramenta disponível, o ATPDraw. Os valores aqui fixados complementam as apresentações dos componentes do sistema elétrico de potência presentes na seção 4.1.1 da proposta trabalho (Componentes do sistema elétrico).

### - O modelo da fonte de tensão trifásica:

São apresentadas a seguir as principais configurações utilizadas na fonte de tensão constante de 13,8 KV que alimenta o circuito de potência.

Gerador



Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
AmplitudeA	Volt	13800	AC	1	
Frequency	Hz	60			
PhaseAngleA	degrees	0			
StartA	sec	0			
StopA	sec	100			

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label: Gerador

Comment:

Type of source:  Current  Voltage

Num phases:  Single  3-phase  3\*1-phase

Angle units:  Degrees  Seconds

Amplitude:  Peak L-G  RMS L-G  RMS L-L

Grounding:  Grounded  Ungrounded

Hide

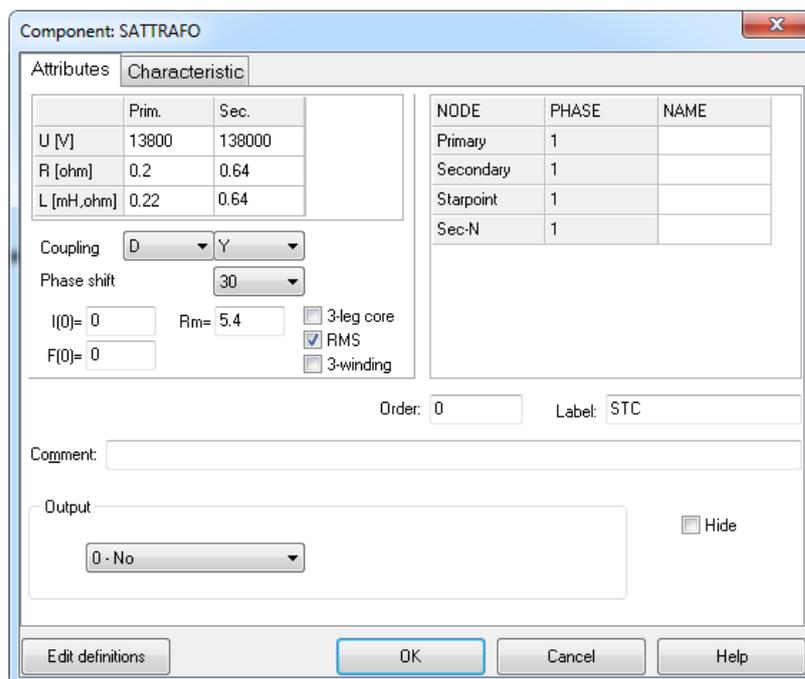
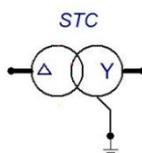
Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: ATP/EMTP - ATPDraw.

### - Os modelos dos transformadores de potência:

Primeiramente, apresenta-se as configurações utilizadas na interface ATPDraw para o transformador de potência trifásico com potência de 35 MVA com dois enrolamentos, sendo o terminal de média tensão

ligado em  $\Delta$  (delta) e o terminal de alta tensão ligado em Y.



Fonte: ATP/EMTP - ATPDraw.

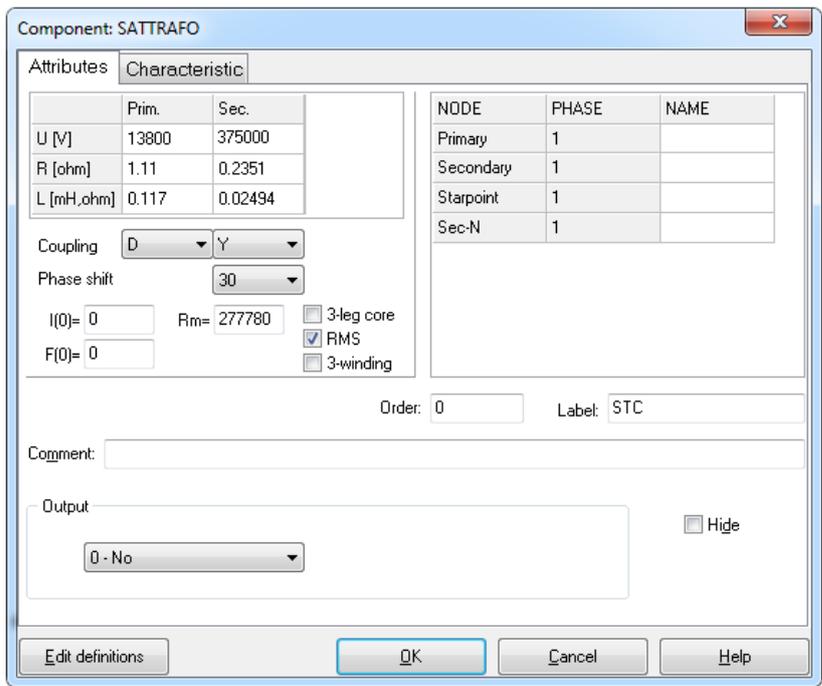
A seguir apresenta-se a característica da curva normal de magnetização utilizada para o projeto do modelo de um transformador de potência de 35MVA.

Tabela A.1 - Característica de Curva de Magnetização do Transformador de Potência – 35MVA

$V_{rms}$ [V]	110	140	180	251	700	1000	4000	8700	10300	11000	13000
$I_{rms}$ [A]	1,2	1,5	2,1	2,8	3,8	4,3	8	15	20	30	10000

Fonte: IEEE Std C57.13 (1993).

As apresentações seguem com as configurações utilizadas na interface ATPDraw para o transformador de potência trifásico com potência de 420 MVA com dois enrolamentos, sendo o terminal de média tensão ligado em  $\Delta$  (delta) e o terminal de alta tensão ligado em Y.



Fonte: ATP/EMTP - ATPDraw.

A característica da curva normal desse conjunto pode ser observada na Tabela a seguir.

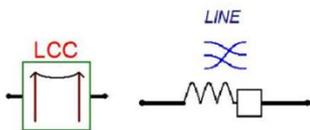
Tabela A.2 - Característica de Curva de Magnetização do Transformador de Potência – 420MVA

$V_{rms}$ [V]	0	1299,5	1646
$I_{rms}$ [A]	0	0	734,85

Fonte: Matlab® Library.

**- O modelo da linha de transmissão:**

Para a linha de transmissão (LT) utiliza-se o modelo JMARTI disponível no ATPDraw. Apresenta-se os dados característicos de uma linha de transmissão trifásica com 80 km de comprimento na tabela a seguir.



Fonte: ATP/EMTP - ATPDraw.

Tabela A.3 – Linha de Transmissão JMARTI (80km)

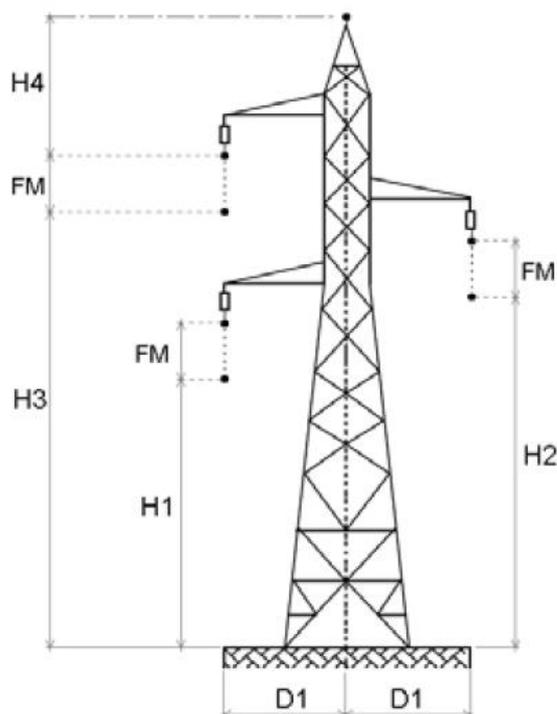
REATÂNCIAS	VALOR	UNIDADE
<i>Resistência de sequência zero</i>	<b>0.7186</b>	<b>Ohms</b>
<i>Indutância de sequência zero</i>	<b>0.3101</b>	<b>mH</b>
<i>Resistência de sequência positiva</i>	<b>11.45</b>	<b>Ohms</b>
<i>Indutância de sequência positiva</i>	<b>2.41</b>	<b>mH</b>

Fonte: Anderson (1999).

A seguir, estão fixadas as características físicas da linha de transmissão.

MEDIÇÕES	VALOR	UNIDADE
<i>D1</i>	<b>4</b>	<b>Metros</b>
<i>H1</i>	<b>8</b>	<b>Metros</b>
<i>H2</i>	<b>12</b>	<b>Metros</b>
<i>H3</i>	<b>16</b>	<b>Metros</b>
<i>H4</i>	<b>2</b>	<b>Metros</b>
<i>FM(flexa máxima)</i>	<b>1,5</b>	<b>Metros</b>

Fonte: Anderson (1999).



## - O modelo dos disjuntores e chaves:

Os disjuntores e chaves apresentam configurações simples que passam pelas configurações dos instantes de fechamento auxiliando nas manobras de energização e aplicação de faltas no sistema de potência.



Component: SWIT\_3XT

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
T-cl_1	s	0	IN1	1	
T-op_1	s	1	OUT1	1	
T-cl_2	s	0			
T-op_2	s	1			
T-cl_3	s	0			
T-op_3	s	1			
Imar	Amps	0			

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label: SW (1,0seg.)

Comment:

Output: 0 - No  Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: ATP/EMTP - ATPDraw.