

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MARIO ORLANDO OLIVEIRA**

**PROTEÇÃO DIFERENCIAL ADAPTATIVA DE  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA BASEADA NA  
ANÁLISE DE COMPONENTES WAVELETS**

Porto Alegre

2013

**MARIO ORLANDO OLIVEIRA**

**PROTEÇÃO DIFERENCIAL ADAPTATIVA DE  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA BASEADA NA  
ANÁLISE DE COMPONENTES WAVELETS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Arturo Suman Bretas**

Porto Alegre

2013

### CIP - Catalogação na Publicação

Oliveira, Mario Orlando  
Proteção Diferencial Adaptativa de Transformadores  
de Potência Baseada na Análise de Componentes Wavelets  
/ Mario Orlando Oliveira. -- 2013.  
123 f.

Orientador: Arturo Suman Bretas.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, BR-RS,  
2013.

1. Transformador de Potência. 2. Proteção  
Diferencial. 3. Transformada Wavelet. 4. Energia  
Espectral. I. Bretas, Arturo Suman, orient. II.  
Título.

MARIO ORLANDO OLIVEIRA

**PROTEÇÃO DIFERENCIAL ADAPTATIVA DE  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA BASEADA NA  
ANÁLISE DE COMPONENTES WAVELETS**

Esta Tese de Doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS

Doutor pela Virginia Tech – Blacksburg, Estados Unidos

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio Carlos Siqueira de Lima, UFRJ

Doutor pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, Brasil

Prof. Dr. Carlos Augusto Duque, UFJF

Doutor pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, Brasil

Prof. Dr. Washington Luiz Araujo Neves, UFCG

Doutor pela University of British Columbia – UBC, Canadá

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology - Gotemburgo, Suécia

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Jr.

Porto Alegre, Setembro de 2013.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha esposa Karina e meu filho Imanol, por serem a luz da minha vida e meus aliados incondicionais nesta importante etapa.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela minha vida e família e por iluminar sempre meu caminho.

A minha esposa Karina e meu filho Imanol, pelo carinho, muita paciência, compreensão e principalmente por me fazerem imensamente feliz.

A meus pais Andrés e Erica, pela constante lição de vida, e toda minha família pela compreensão dos tantos momentos em que estive ausente em virtude dos trabalhos do curso de doutorado.

Ao meu orientador prof. Dr. Arturo Suman Bretas pelos ensinamentos, orientação e toda disposição oferecida e, sobretudo pela confiança depositada em mim.

Ao programa PEC-PG (Programa de Estudante Convênio de Pós-Graduação) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior), pela bolsa de estudos propiciando a concretização desta tese.

A meus colegas do Laboratório de Sistemas de Elétricos de Potência –LASEP, pelos trabalhos e momentos compartilhados ao longo do período de pós-graduação.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica –DELET, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelos ensinamentos e ajuda durante a minha permanência nesta universidade.

Às autoridades e amigos da Facultad de Ingeniería de Oberá, da Universidad Nacional de Misiones –UNaM Argentina, por me apoiar nesta etapa de aperfeiçoamento.

Às autoridades, colegas e amigos da Faculdade SATC –Associação Benéfica da Indústria Carbonífera de Santa Catarina pela oportunidade de me desempenhar como professor e pelos gratos momentos compartilhados.

Ao povo brasileiro por ter me acolhido muito bem.

Sinceramente, muito obrigado.

## RESUMO

Este trabalho fundamenta-se no desenvolvimento e aprimoramento de uma metodologia de proteção diferencial de Transformadores de Potência. A metodologia desenvolvida avalia eventos transitórios que dificultam a operação correta de relés diferenciais aplicados à proteção de transformadores. O estudo concentra-se no estabelecimento de contribuições ao estado da arte associadas à análise de sinais de corrente diferenciais geradas tanto por faltas internas e externas quanto por distúrbios transitórios. A concepção da metodologia proposta baseou-se na quantificação da energia espectral gerada a través dos coeficientes de detalhe da Transformada Wavelet Discreta. A metodologia de proteção proposta foi desenvolvida em ambiente MATLAB® e testada por meio de simulações realizadas através do *software* ATP/EMTP (*Alternative Transients Program/Electromagnetic Transients Program*). Os resultados da pesquisa mostram a aplicabilidade do algoritmo de proteção, mesmo nas condições mais adversas, como na ocorrência da saturação dos transformadores de corrente.

**Palavras-chave:** Transformador de Potência. Proteção Diferencial. Adaptabilidade. Transformada Wavelet Discreta. Energia Espectral.

## **ABSTRACT**

This work is based on the development and improvement of a methodology to differential protection of power transformer. The proposed methodology evaluates transient events that difficult the correct operation of differential relays applied to transformer protection. The study establishes contributions to the state of the art related to differential current analysis generated by internal and external faults and transient disturbance. The conception of the proposed methodology was based on the spectral energies variation generated by each event and calculated through the detail coefficient of Discrete Wavelet Transform. The proposed methodology was developed in MATLAB® environment and tested through several simulations performed with the ATP/EMTP software (Alternative Transients Program / Electromagnetic Transients Program). The results of the research show the applicability of the protection algorithms, even in adverse conditions, such as saturation of current transformers.

**Keywords: Power Transformer. Differential Protection. Adaptability. Discrete Wavelet Transform. Spectral Energy.**

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	18
1.1 Contextualização do Problema .....	18
1.2 Justificativa do Estudo .....	19
1.3 Objetivos Propostos.....	21
1.4 Contribuições do Trabalho .....	22
1.5 Organização da Tese .....	22
2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	23
2.1 Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência .....	24
2.1.1 Faixas de Frequência dos Fenômenos Transitórios .....	24
2.2 Tipos de Falhas em Transformadores .....	25
2.2.1 Projeto de Sistemas de Proteção.....	26
2.3 Métodos de Proteção de Transformadores .....	26
2.4 Filosofia de Proteção Diferencial .....	29
2.4.1 Proteção Diferencial Percentual .....	30
2.4.2 Características de Operação do Relé Diferencial Percentual .....	31
2.5 Fenômenos não Faltosos que Geram Correntes Diferenciais.....	32
2.5.1 Correntes de Magnetização Durante a Energização do Transformador .....	33
2.5.2 Saturação de Transformadores de Corrente (TCs) .....	35
2.5.3 Sobre-excitação de Transformadores de Potência.....	37
2.5.4 Remoção de Falhas Próximas ao Transformador .....	38
2.5.5 Rejeição de Carga.....	38
2.5.6 Diferenças nas Características dos TCs.....	38
2.5.7 Energização de Transformadores em Paralelo (Energização Solidária).....	39
2.6 Modelagem de Transformadores para Estudos de Fenômenos Transitórios .....	40
2.6.1 Considerações Para a Modelagem de Transformadores .....	41
2.6.2 Critérios Utilizados Para a Classificação dos Modelos .....	42
2.6.2.1 Critérios de Modelagem Baseados em Princípios Físicos .....	42
2.6.2.2 Outros Critérios Para Classificação dos Modelos.....	43
2.7 Metodologias Utilizadas no Aprimoramento da Proteção Diferencial.....	44
2.7.1 Proteção Diferencial Digital de Transformadores .....	44
2.7.2 Proteção Diferencial de Transformadores Utilizando a Transformada Wavelet (TW) ...	46
2.7.3 Proteção Diferencial de Transformadores com Combinação de Técnicas de Análise ....	48
2.8 Sumário .....	49

3.	METODOLOGIA DE PROTEÇÃO PROPOSTA.....	50
3.1	Introdução à Análise de Sinais .....	51
3.2	Comparação da Transformada Wavelet com a Transformada de Fourier.....	52
3.2.1	Introdução à Transformada de Fourier .....	53
3.2.2	Transformada de Fourier Janelada (TFJ).....	54
3.2.3	Introdução à Transformada Wavelet (TW) .....	56
3.2.4	Principais Diferenças entre a TF e TW .....	58
3.3	Análise Multi-Resolução (AMR) .....	59
3.4	Energia Wavelet do Sinal e Espectro de Potência.....	60
3.5	Descrição do algoritmo de Proteção Proposto .....	61
3.5.1	Fundamentação para Classificação de Distúrbios .....	62
3.5.2	Estrutura Geral do Fluxo de Dados .....	63
3.5.3	Estrutura Geral do Algoritmo de Proteção .....	64
2.5.3.1	Bloco 1: Detecção do Distúrbio.....	64
2.5.3.2	Bloco 2: Discriminação do Distúrbio .....	66
3.6	Sumário .....	70
4.	ESTUDO DE CASO E RESULTADOS.....	71
4.1	Sistemas Elétrico Estudado .....	71
4.2	Modelagem da Rede Elétrica no ATP/EMTP .....	72
4.2.1	Descrição dos elementos Utilizados na Modelagem do SEP .....	72
4.2.1.1	Gerador .....	72
4.2.1.2	Transformador de Potência (TDP).....	73
4.2.1.3	Transformador de Corrente (TC).....	74
4.2.1.4	Linha de Transmissão (LT).....	75
4.2.1.5	Carga Elétrica .....	76
4.2.1.6	Chaves Trifásicas de Tempo Controlado.....	77
4.3	Avaliação da Metodologia Proposta: Simulações Realizadas.....	78
4.3.1	Fenômenos Estudados .....	78
4.3.2	Simulação de Falhas Internas no TDP.....	78
4.3.2.1	Falhas Internas Repentinhas (FIR) .....	78
4.3.2.2	Falhas Internas Incipientes (FII).....	80
4.3.2.3	Falhas entre Enrolamentos Primários e Secundários .....	82
4.3.3	Simulação de Condições Não Faltosos (Transitórias).....	83
4.3.3.1	Energização do Transformador –Corrente de <i>Inrush</i> .....	83
4.3.3.2	Energização de Transformadores em Paralelo –Energização Solidária.....	85
4.3.3.3	Falta Externa ao Transformador .....	86
4.3.3.4	Sobre-Excitação de Transformadores .....	87
4.3.4	Simulação de Outros Eventos.....	87
4.3.4.1	Energização de Transformadores com Presença de Falta Interna.....	88

4.3.4.2	Sobre-Excitação de Transformadores com Presença de Saturação de TCs .....	88
4.4	Avaliação da Metodologia Proposta: Resultados Obtidos .....	90
4.4.1	Quantificação do Desempenho do Algoritmo .....	90
4.4.2	Desempenho do Algoritmo Perante Variação da Resistência de Falta.....	90
4.4.3	Desempenho do Algoritmo Perante Variação do Nível de Carga no TDP.....	93
4.4.4	Desempenho do Algoritmo Perante Variação do Fator de Potência da Carga .....	98
4.4.5	Desempenho do Algoritmo Perante Variação do Instante de Energização .....	99
4.4.6	Desempenho do Algoritmo Perante Variação da Função Wavelet .....	100
4.4.7	Desempenho do Algoritmo Perante a Técnica Tradicional de Fourier .....	101
4.5	Sumário .....	102
5.	CONCLUSÕES.....	103
5.1	Modelagem de Transformadores para Análise de Transitórios.....	105
5.2	Utilização da Transformada Wavelet Discreta.....	106
5.3	Influência da Wavelet Mãe Utilizada no Processo de Discriminação.....	107
5.4	Influência da Resistência de Falta .....	107
5.5	Influência da Carga Conectada ao Transformador .....	108
5.6	Estudo de Faltas Internas Incipientes .....	109
5.7	Estudo de Comparação com a Técnica de Fourier .....	109
5.8	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	109
	Referências .....	111
	Apêndice –Publicações associadas à Presente Pesquisa .....	122

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Conexões básicas de um sistema de proteção diferencial de transformadores. ....	29
Figura 2 Curva característica de operação do relé diferencial (adaptado de HARLOW, 2007).....	32
Figura 3 Forma de onda típica da corrente de energização (IEEE Std. C37.91, 2008).....	33
Figura 4 Forma de onda das correntes primárias e secundárias de um TC saturado.....	36
Figura 5 Corrente de excitação de um transformador sobre-excitado (adaptado de: HARLOW, 2007). ....	37
Figura 6 Esquematização do fenômeno de energização solidária (KULKARNI; KHAPARDE, 2005; HOROWITZ; PHADKE, 2008). ....	40
Figura 7 Sinal não estacionária e espectro de frequências obtidas através da TFD. ....	54
Figura 8 Resolução tempo-frequência da WDFT.....	55
Figura 9 WDFT do sinal da Figura 7 realizada com janela gaussiana de $a = 180$ . ....	56
Figura 10 Formas básicas de algumas wavelets mães.....	57
Figura 11 Plano tempo-frequência para a WDFT e TW. ....	59
Figura 12 Banco de filtros multi-estágio para AMR (implementação da TWD).....	60
Figura 13 Esquema monofásico de proteção diferencial de transformadores. ....	62
Figura 14 Espectro wavelet especificando os níveis de detalhe utilizados na classificação dos diferentes tipos de distúrbios (adaptado de GAUODA et al., 1999). ....	63
Figura 15 Estrutura geral do fluxo de dados da metodologia proposta. ....	64
Figura 16 Fluxograma geral da metodologia de proteção proposta. ....	66
Figura 17 Decomposição da corrente diferencial em diferentes faixas de frequências (detalhes) através da TWD. ....	67
Figura 18 Representação das energias calculadas para cada nível de detalhe da TWD.....	68
Figura 19 Representação da adaptabilidade do valor limiar $T_H$ (OLIVEIRA et al., 2012a). ...	69
Figura 20 Esquema representativo do sistema elétrico modelado no ATP/EMTP. ....	71
Figura 21 Símbolo e janela de parametrização no ATPDraw de máquina síncrona – SM59_NC.....	73
Figura 22 Símbolo e entrada de dados no ATPDraw do modelo <i>Hybrid Transformer</i> .....	74
Figura 23 Curva de saturação dos TCs de utilizados nas simulações (IEEE Std. C57.13, 2008).....	75
Figura 24 Símbolo e janela de parametrização no ATPDraw do modelo de LT tipo LCC.....	76
Figura 25 Símbolo e janela de parametrização no ATPDraw do modelo RLCY3.....	76
Figura 26 Símbolo e janela de parametrização no ATPDraw da chave trifásica SWIT_3XT. ....	77
Figura 27 Condição de FIR bifásica tipo A-B-T com resistências de falta de: $R_{fA} = 25 \Omega$ e $R_{fB} = 250 \Omega$ .....	79
Figura 28 Decomposição wavelet de um sinal diferencial correspondente a uma falta interna monofásica tipo $F_A$ -T com $R_{fA} = 20 \Omega$ em um TDP de 150 MVA. ....	79

Figura 29 Modelagem do transformador como braços R-L mutuamente acoplados. (a) falta espira-terra, (b) falta espira-espira.....	81
Figura 30 Energização do TDP1 em 0,1 segundos nas fases A, B e C. ....	84
Figura 31 Decomposição wavelet de um sinal diferencial correspondente a uma energização na fase A do transformador de 30 MVA. ....	84
Figura 32 Circuito para simulação de energização solidária ( <i>Sympathetic Inrush</i> ). ....	85
Figura 33 Condição de falta externa trifásica no lado secundário do TDP de 150 MVA, Y- $\Delta$ com $R_f = 0,1 \Omega$ . ....	86
Figura 34 Energização do transformador de 30 MVA em 0,1 segundos com presença de falta interna. ....	87
Figura 35 Decomposição wavelet de um sinal diferencial correspondente à energização na fase B de um TDP de 30 MVA simultaneamente à ocorrência de uma falta interna na mesma fase.....	88
Figura 36 Correntes diferenciais trifásicas geradas por sobre-tensão de 120 % em um TDP de 30 MVA. ....	89
Figura 37 Decomposição wavelet de um sinal diferencial correspondente à saturação de TCs simultaneamente à ocorrência de sobre-excitação do TDP de 30 MVA. ....	89
Figura 38 Variação da precisão do algoritmo em função da resistência de falta para TDP de 30 MVA. ....	92
Figura 39 Variação da precisão do algoritmo em função da resistência de falta para TDP de 150 MVA. ....	93
Figura 40 Eficiência do algoritmo em função da carga na LT para o TDP de 30 MVA, Parte I.....	96
Figura 41 Eficiência do algoritmo em função da carga na LT para o TDP de 30 MVA, Parte II. ....	96
Figura 42 Eficiência do algoritmo em função da carga na LT para os TDPs de 150 MVA, Parte I.....	97
Figura 43 Eficiência do algoritmo em função da carga na LT para os TDPs de 150 MVA, Parte II. ....	97
Figura 44 Variação da precisão do algoritmo em função do fator de potência. ....	98
Figura 45 Variação da precisão do algoritmo em função do instante de energização.....	99
Figura 46 Variação da precisão do algoritmo em função da função wavelet.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Eventos transitórios em SEP e suas frequências associadas.....	24
Tabela 2	Principais funções da proteção digital de transformadores. ....	28
Tabela 3	Principais características técnicas dos TDP utilizados no estudo.....	74
Tabela 4	Cargas conectadas no final da LT utilizadas nas simulações efetuadas. ....	77
Tabela 5	Casos testes de FIR sob o TDP (4.928 casos). ....	80
Tabela 6	Casos testes de FII no TDP (1.344 casos). ....	82
Tabela 7	Casos testes de faltas entre bobinados primários e secundários dos TDPs (560 casos). ....	83
Tabela 8	Casos testes para energização dos TDPs (2.016 casos). ....	85
Tabela 9	Casos teste para energização de TDP em paralelo (288 casos). ....	86
Tabela 10	Casos testes de faltas externas ao transformador (1.728 casos). ....	86
Tabela 11	Casos teste de sobre-excitação de transformadores (180 casos). ....	87
Tabela 12	Casos teste para energização de TDP junto a falta interna (3.360 casos).....	88
Tabela 13	Casos teste de sobre-excitação de TDP junto a saturação de TCs (360 casos). ....	90
Tabela 14	Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP e diferentes situações faltosas. ....	91
Tabela 15	Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP e diferentes situações faltosas. ....	91
Tabela 16	Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP e diferentes situações faltosas. ....	91
Tabela 17	Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP e diferentes situações faltosas. ....	92
Tabela 18	Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP com nível de carga de 0 % (TDPs a vazio) e diferentes condições operacionais. ....	93
Tabela 19	Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP com nível de carga de 50 % e diferentes condições operacionais. ....	94
Tabela 20	Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP com nível de carga de 100 % e diferentes condições operacionais. ....	94
Tabela 21	Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP com nível de carga de 150 % e diferentes condições operacionais. ....	95
Tabela 22	Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para três tipos de TDP considerando a variação do Fator de Potência (FP) a carga nominal. ....	98
Tabela 23	Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para três tipos de TDP considerando a variação do instante de energização. ....	99
Tabela 24	Desempenho global do algoritmo de proteção diferencial considerando diferentes Funções Wavelets (Wavelets Mães). ....	100

Tabela 25 Comparação do desempenho global do algoritmo de proteção diferencial proposto com a Técnica de Fourier. ....	102
--	-----

## LISTA DE ABREVIATURAS

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
AMR	Análise Multi-Resolução
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
E	Energização
ES	Energização Solidária
FE	Falta Externa
FB	Falta entre Bobinados
FP	Fator de Potência
FT	Falta Fase–Terra
FFT	Falta Bifásica–Terra
FFF	Falta Trifásica
FIR	Falta Interna Repentina
FII	Falta Interna Incipiente
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LF	Lógica Fuzzy
LT	Linha de Transmissão
LTC	<i>Load Tap Changed</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
OP	Operações Corretas
OI	Operações Incorretas
PDS	Processamento Digital de Sinais
RNA	Rede Neural Artificial
SE	Sobre-Excitação
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
TDP	Transformador de Potência

TC	Transformador de Corrente
TF	Transformada de Fourier
TFD	Transformada de Fourier Discreta
TFJ	Transformada de Fourier Janelada
TRF	Transformada Rápida de Fourier
TW	Transformada Wavelet
TWD	Transformada Wavelet Discreta
TWDI	Transformada Wavelet Diádica
TWC	Transformada Wavelet Contínua
TWP	Transformada Wavelet Packet
WDFT	Transformada Discreta de Fourier Janelada ( <i>Windowed Discret Fourier Transform</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\partial$	Incrementos aplicados às variáveis estudadas
%	Porcentagem de uma variável
$\varepsilon$	Eficiência do algoritmo proposto
$\Delta$	Conexão delta do enrolamento do transformador
Y	Conexão estrela do enrolamento do transformador
$k$	Característica diferencial percentual
$\delta$	Fator de compensação
$\lambda$	Sensibilidade do algoritmo à variação de energia dos coeficientes wavelet

## 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório será apresentada inicialmente uma contextualização da problemática abordada neste trabalho. Além disso, as justificativas para realização desta pesquisa serão explanadas as quais se associam à concepção e aprimoramento de metodologias numéricas para proteção diferencial de transformadores trifásicos. Os objetivos relacionados ao referido estudo também serão apresentados junto às principais contribuições da pesquisa, tendo seu argumento principal na necessidade de desenvolvimento de metodologias adaptativas para proteção de transformadores. Por fim, a organização da tese é também descrita.

### 1.1 Contextualização do Problema

Os sistemas de potência estão sujeitos a fenômenos transitórios que podem ser ocasionados, por exemplo, por descargas atmosféricas, acionamento de cargas indutivas (motores, transformadores), chaveamento de capacitores, faltas elétricas e fontes chaveadas. Assim, em função das características destes fenômenos e do “nível de imunidade” dos equipamentos atuais, nota-se que diversos eventos indesejáveis podem ocorrer, tais como acionamentos indevidos de relés, funcionamento incorreto de equipamentos eletro-eletrônico, distorções harmônicas e interrupções no fornecimento de energia. Ressaltam-se desta forma, além dos aspectos técnicos indesejáveis, aqueles que poderão resultar em prejuízos econômicos de grande vulto, tanto para as concessionárias como para os consumidores.

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) pode ser dividido basicamente nos grupos de geração, transmissão e distribuição os quais são planejados, construídos e operados de forma a suprir a demanda de energia elétrica aos seus consumidores dentro de determinados patamares de qualidade, continuidade e confiabilidade. No entanto, a rapidez da evolução dos avanços tecnológicos somado à crescente necessidade de uma maior oferta de energia elétrica têm impulsionado os governos e as empresas privadas à expansão do sistema elétrico no mundo todo.

Dentro da operação dos SEP determinados eventos, tais como surtos de manobra ou situações transitórias, fazem com que o sistema elétrico esteja sempre predisposto a sofrer algum tipo de perturbação. Essas condições inadequadas de operação, indesejáveis pero frequentes, podem oferecer riscos a equipamentos e até aos usuários do sistema elétrico. Neste sentido, todo sistema de proteção que seja desenvolvido para mitigar esses efeitos são sempre justificados.

Um SEP está constituído por diferentes equipamentos dentre os quais se destaca, tanto por importância técnica quanto econômica, o Transformador de Potência (TDP). Segundo (HARLOW, 2007) o termo Transformador de Potência é utilizado para se referir àqueles transformadores que são conectados entre o gerador e o sistema elétrico de distribuição, os quais são geralmente de 500 kVA ou superiores. Este equipamento é fundamental dentro da

operação dos SEP e os mesmos estão constantemente submetidos aos efeitos adversos dos transitórios elétricos necessitando de cuidados especiais. Quando estes equipamentos apresentam algum tipo de falha, seu reparo demanda altíssimos custos financeiros tanto pelo elevado custo comercial, bem como pelas possíveis multas aplicadas devido à indisponibilidade temporária de energia. Assim, diferentes filosofias como, por exemplo: elos fusíveis, relés de sobrecorrente, relés diferenciais, relés de pressão, análise química dos gases e monitoramento de temperatura dos enrolamentos são utilizadas objetivando garantir a proteção do transformador.

Das técnicas de proteção supracitadas, a filosofia mais utilizada como proteção primária dos transformadores, seja de potência ou não, é o uso de relés diferenciais. Isso faz também com que seja uma das técnicas de proteção mais aprimorada nos últimos tempos dado que, ainda sendo muito utilizada, apresenta ineficiência na identificação e discriminação de determinados eventos, como por exemplo, as correntes de energização conhecidas também como “correntes de *inrush*<sup>1</sup>”. Outros eventos, tais como, saturação de Transformadores de Corrente (TCs), erro na relação de transformação de TCs, faltas externas próximas ao transformador, sobre-excitação e energização de TDP conectados em paralelo (*sympathetic inrush*) também geram correntes diferenciais no circuito do relé de proteção e este pode operar sem ser necessário. Assim, a correta e rápida distinção entre estes eventos e as faltas internas no transformador representa uma das principais dificuldades encontradas na proteção diferencial de transformadores.

Os relés de proteção são aplicados em equipamentos de um SEP por várias razões entre as quais se destacam: isolar o equipamento do resto do sistema, minimizar os danos nos equipamentos faltosos, minimizar a possibilidade de fogo, minimizar os riscos para as pessoas e minimizar os riscos de danos em equipamentos adjacentes ao local da falta (IEEE Std. C37.91<sup>TM</sup>, 2008). No entanto, as operações incorretas identificadas nos relés diferenciais perante os eventos acima citados não permitem que estes relés de proteção sejam totalmente eficientes na sua operação. Nesse sentido, algumas ferramentas são utilizadas para mitigar esses problemas como, por exemplo, as restrições da operação baseado na análise de componentes de segunda e quinta harmônicas (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

Vale salientar que além dos possíveis atrasos que os métodos de filtragem possam proporcionar para a obtenção das componentes harmônicas, determinadas situações de faltas internas, também podem conter componentes de segunda harmônica, o que provocaria um provável erro no processamento da informação (PILHER; GREAR; DOLINAR, 1997).

Por outro lado, a maioria dos relés diferenciais comerciais não protegem os transformadores para situações de faltas internas que acontecem a menos de 15% do enrolamento, ou seja, aquelas faltas que começam entre poucas espiras (conhecidas também como faltas incipientes). Para estas situações faltosas, se recomenda habilitar a função “terra restrita” nos relés diferenciais digitais que verifica a corrente de neutro no transformador, no entanto, aumenta a complexidade de parametrização do sistema de proteção associado ao TDP (BARBOSA, 2010).

## 1.2 Justificativa do Estudo

O uso de corrente alternada para transmissão e distribuição de energia elétrica é largamente utilizado devido ao fato de esses circuitos, geralmente de diferentes níveis de tensão, poderem ser interligados através de transformadores. Essa importante função do transformador permitiu um rápido desenvolvimento dos sistemas de geração e transmissão de energia

---

<sup>1</sup> O termo *inrush* significa “irrupção”, traduzido literalmente do inglês, o que dá à ideia de referir-se a um evento que acontece rapidamente.

elétrica. Além disso, considerando a tendência do mercado elétrico em direção à livre competição, vem crescendo o interesse dos fabricantes e dos entes reguladores sobre os índices de desempenho e de confiabilidade dos SEP, contexto no qual o transformador tem um papel fundamental (PENA, 2003).

A demanda crescente por energia elétrica e a sobrecarga atual dos SEP impõem a necessidade cada vez maior do uso de ferramentas adequadas para monitoramento e diagnóstico do estado operacional dos sistemas de proteção e equipamentos elétricos, de modo a aumentar a sua confiabilidade e reduzir o número de paradas programadas e eventuais, otimizando assim o fornecimento de energia elétrica e o uso das instalações.

Os TDP são componentes críticos e caros dentro da configuração dos SEP e seu eventual desligamento, perante uma situação faltosa ou fenômenos transitórios, gera transtornos na operação do sistema elétrico. Estes equipamentos transformam tensão e corrente alternada, entre dois ou mais enrolamentos, permitindo a interligação de sistemas elétricos de diversos níveis de tensão possibilitando a transmissão de energia até os centros de consumo localizados algumas vezes a grandes distâncias, reduzindo as perdas e atuando no controle de fluxo de potência. O uso generalizado dos transformadores exige critérios cada vez mais avançados de dimensionamento, construção e principalmente de proteção, objetivando conciliar o custo com a segurança operacional. Estes fatos fazem com que seja necessário garantir seu correto funcionamento no sentido de evitar possíveis falhas que venham ocorrer devido a determinados regimes elétricos aos quais os TDP são submetidos (OLIVEIRA; BRETAS, 2010a).

Nos SEP encontram-se diferentes tipos de transformadores com características técnicas específicas para atender às mais diversas aplicações. Isso faz com que a modelagem deste equipamento deva ser feita considerando inúmeros fatores construtivos e principalmente tendo em consideração as características de operação e o tipo de falha a ser estudada (OLIVEIRA; BRETAS, 2010b). Segundo apresentado em (BÉCHARRA; BRANDÃO Jr., 2009), as partes mais significativas no que diz respeito à ocorrência de falhas em transformadores são os enrolamentos, o comutador sob carga e as buchas. Nesse sentido, qualquer problema que aconteça em um destes componentes implicaria na atuação do sistema de proteção diferencial retirando o transformador de operação objetivando evitar falhas maiores associadas a elevados custos de manutenção e longos períodos de desabastecimento de energia. Assim, salienta-se a importância técnica e econômica da proteção diferencial no monitoramento de falhas em TDP.

Além do descrito anteriormente, vários outros fatores contribuem para tornar os TDP um elemento fundamental nos sistemas de transmissão de alta e extra-alta tensão, necessitando, portanto, de atenção especial. Destacam-se entre estes fatores os seguintes (PENA, 2003):

- Elevado custo de investimento: é um equipamento com elevado valor de aquisição e restauração;
- Prazo de aquisição não-imediata: tendo em vista as características especiais de cada sistema e os processos de fabricação envolvidos, o transformador não é um equipamento que possa ser construído de um dia para outro, ainda mais quando se trata de potências elevadas;
- Impossibilidade de transportá-lo montado: devido ao peso e às dimensões, bem como à fragilidade de alguns componentes, os transformadores de alta e extra-alta tensão não podem ser transportados montados, ou seja, em condições prontas para operar;
- Elevado tempo de montagem: considerando as dificuldades técnicas e a necessidade de recursos logísticos de grande porte envolvidos na montagem em campo, além dos imprescindíveis trabalhos de tratamento do óleo isolante, o transformador é o

equipamento que demanda mais tempo de montagem quando comparado com outros equipamentos de pátio de subestação, por exemplo.

Existe ainda, considerando fatores de manutenção preditiva em TDP, a necessidade de desenvolvimento de ferramentas de diagnóstico, monitoramento e avaliação das condições internas dos transformadores objetivando identificar falhas incipientes. Tradicionalmente, rotinas de manutenção preventivas combinadas com testes regulares eram utilizadas. Com a desregulamentação do setor elétrico, aumentou-se a necessidade de redução dos custos de manutenção bem como da redução do número de desligamentos dos equipamentos, levando à substituição dos tradicionais programas de manutenção baseadas no tempo, por programas de manutenção baseados nas condições (WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2002).

Neste contexto, o desenvolvimento de metodologias inovadoras para análise de surtos transitórios e faltas impulsiva em altas frequências que estejam focadas no aprimoramento de métodos numéricos de proteção de TDP é inédito e salienta a relevância do trabalho proposto.

Todos os aspectos abordados justificam o desenvolvimento do estudo proposto neste trabalho e dão uma ideia da complexidade que envolve projetar um sistema de proteção para transformadores de grande porte para operação em SEP. O elevado custo envolvido, a grandiosidade da logística necessária e o tempo que demanda reparar uma unidade danificada são algumas das dificuldades decorrentes de uma falha em um transformador. Destaca-se ainda que, falhas em TDP têm sido responsáveis por grandes blecautes no sistema elétrico brasileiro, fato que acrescenta importância ao tópico abordado neste trabalho.

### **1.3 Objetivos Propostos**

O objetivo principal deste trabalho é estabelecer contribuições à representação, análise e modelagem da filosofia de proteção diferencial de TDP vinculado ao estudo de faltas internas, faltas externas e eventos transitórios provenientes da operação deste equipamento. Para tanto, tem-se como foco o desenvolvimento e aprimoramento de algoritmos de proteção baseados na análise de energia espectral dependente das características das componentes de detalhe wavelets derivadas de cada tipo de evento. Com este foco, a utilização da Transformada Wavelet Discreta (TWD) será utilizada objetivando caracterizar cada tipo de evento.

Por outro lado, tem-se também como objetivo o desenvolvimento de uma técnica de proteção robusta e adaptativa que permita avaliar diferentes tipos de transformadores independentemente do sistema elétrico ao qual o equipamento encontra-se conectado. Isto permitirá que o algoritmo de proteção seja adaptável a outro tipo de configuração de sistema elétrico.

Outro objetivo está focado na implementação de modelos de transformadores para simulação e análise de faltas incipientes dado que este tipo de falta não é corretamente identificada pelas metodologias de proteção atuais.

A avaliação de diferentes ferramentas computacionais para Processamento Digital de Sinais (PDS) com possibilidade de aplicação na metodologia de proteção proposta também é um objetivo importante deste trabalho.

Vale salientar que o intuito desta tese não é fornecer o equacionamento matemático para a modelagem e/ou construção física de um transformador de potência, mas sim fazer uma análise dos distúrbios elétricos transitórios que venham ocorrer nas instalações onde os TDP estejam instalados. Além disso, objetiva-se que os estudos a serem desenvolvidos auxiliem aos pesquisadores, engenheiros de proteção e projetistas no sentido de verificar como eventos transitórios influenciam no comportamento dos sistemas de proteção deste equipamento.

## 1.4 Contribuições do Trabalho

Esta tese de doutorado consiste basicamente no desenvolvimento de uma ferramenta para diagnóstico de falhas e caracterização de fenômenos transitórios em TDP. Assim, considerando a energia espectral gerada por cada sinal diferencial, o algoritmo proposto, deve ser capaz de determinar o tipo de falha existente no equipamento além de discriminar uma situação faltosa de um evento transitório não faltoso. As informações utilizadas para identificação das faltas no transformador são os sinais de corrente diferencial procedentes dos Transformadores de Corrente (TCs) conectados no enrolamento primário e secundário do TDP a ser protegido. Neste sentido, as principais contribuições deste trabalho são:

- elaboração de um algoritmo adaptativo capaz de detectar situações operativas perigosas para a vida útil de TDP que considere tanto as características dos eventos transitórios quanto a configuração e tipo de transformador;
- utilização da Transformada Wavelet Discretas (TWD) para a proteção de transformadores de potência. Vale salientar que a aplicação desta técnica na proteção de transformadores é original, pois além da alteração da referência no cálculo da transformada, esta não utiliza a estimação de componentes harmônicos em nenhuma parte do processo de decisão, o que torna diferente da maioria das metodologias propostas no estado da arte;
- desenvolvimento de um algoritmo de monitoramento que classifique as várias condições operativas do equipamento protegido, não somente as situações de energização e faltas internas. Assim, o monitoramento proposto possui uma maior abrangência, em relação a outros trabalhos, quanto ao número de condições observáveis.

## 1.5 Organização da Tese

Além deste, a presente tese foi dividida em mais quatro capítulos sumarizados a seguir.

O capítulo 2 tem seu foco na revisão do estado da arte, onde definições importantes relacionadas à filosofia de proteção diferencial e seus principais problemas são apresentadas. Uma breve descrição do histórico de pesquisas relacionadas ao referido tema é relatada. As principais metodologias de proteção de TDP são abordadas em forma sucinta junto às considerações básicas para a modelagem de transformadores quando estudos de transitórios e faltas internas são desenvolvidos. Um detalhamento básico das técnicas utilizadas no aprimoramento do sistema de proteção de relés diferenciais também é detalhado neste capítulo.

O capítulo 3 descreve o algoritmo computacional para proteção diferencial de TDP proposto, baseado na análise de componentes wavelets. Neste capítulo uma descrição mais detalhada das características de energia espectral geradas pelos eventos simulados é apresentada onde uma descrição do comportamento das componentes wavelet é necessária. Por fim, contribuições ao estudo de eventos transitórios são apresentadas ressaltando as potencialidades da metodologia proposta.

O capítulo 4 contextualiza a aplicação do método de proteção desenvolvido com base em estudos de caso. Neste contexto, apresenta-se a modelagem do sistema elétrico de potência estudado junto aos principais resultados obtidos nas simulações e testes realizados.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com a pesquisa realizada, além de sugestões para trabalhos futuros.

No apêndice são listadas as publicações do autor referentes ao tema da tese.

## **2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE**

Neste capítulo faz-se uma revisão do estado da arte de questões pertinentes a trabalhos em destaque sobre a temática abordada neste estudo. Assim, uma descrição sucinta sobre transitórios em SEP é apresentada junto aos principais tipos de faltas que geralmente acontecem nos transformadores. Definições e parâmetros relevantes para a representação e estudo da filosofia de proteção diferencial percentual são comentados. Além disso, os principais trabalhos que abordam os problemas da proteção diferencial de transformadores são apresentados, sendo enfatizadas suas vantagens e desvantagens. Os principais critérios para modelagem de TDP são também abordados.

### **2.1 Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**

A operação de um SEP envolve uma contínua distribuição e troca de energia eletromecânica e eletromagnética entre os componentes do sistema. Durante a operação normal, com carga e topologia elétrica constante, a troca de energia é modelada explicitamente e o comportamento do sistema elétrico é representado através de fasores de tensão e corrente no domínio da frequência. No entanto, eventos de chaveamento e distúrbios transitórios levam a alterações rápidas e bruscas destes fasores, provocando sobretensões e/ou sobrecorrentes no sistema elétrico (WATSON; ARRILLAGA, 2007). A avaliação da magnitude, duração e frequência desses distúrbios são de alto interesse tendo em vistas as possíveis interferências em equipamentos sensíveis da instalação (CARVALHO; PEREIRA; BACHMANN, 2003).

Uma classe de fenômenos transitórios em SEP diz respeito a oscilações mecânicas em sistemas turbogeradores que, tipicamente, são causadas por faltas, eliminação de faltas, falhas em equipamentos ou mudanças bruscas de carga. Outra classe diz respeito a transitórios rápidos de origem eletromagnéticos em que parâmetros concentrados são descritos por equações diferenciais ordinárias. Os transitórios podem ser muito rápidos, na faixa de nano a microssegundos (como em operações de desligamento em subestações isoladas a gás), ou podem ser mais lentos, na faixa de milissegundos a segundos (como no caso de sobretensões de manobra em linhas de transmissão) (DE ARAUJO; NEVES, 2005).

Sob o ponto de vista do isolamento dos TDP, devem ser analisadas as causas que originam as sobretensões no sistema elétrico. Sob o ponto de vista mecânico e térmico da construção dos enrolamentos, devem ser analisadas as causas que originam as sobrecorrentes. Neste sentido, de forma geral pode-se dizer que as sobretensões são geradas por descargas atmosféricas e chaveamentos no sistema elétrico (energização, rejeição de carga, operação de relés de proteção) e seus efeitos traduzem-se em ruptura do isolamento interno ou externo do transformador. Por outro lado, as sobrecorrentes são geradas por chaveamentos ou curto-circuitos internos que geram por sua vez esforços mecânicos e sobreaquecimento nos enrolamentos (RIES, 2007).

### 2.1.1 Faixas de Frequência dos Fenômenos Transitórios

Os sistemas elétricos de potência estão constantemente expostos à ocorrência de fenômenos transitórios originados por diferentes eventos (por exemplo, faltas, manobras de operação e fenômenos atmosféricos). Esses fenômenos transitórios influenciam de forma relevante no desempenho dos sistemas de proteção, gerando a necessidade de conhecer a resposta desses sistemas perante esses eventos. Além disso, os transitórios eletromagnéticos geram sinais que abrangem um amplo espectro de frequências e que geralmente estão caracterizadas pelo fenômeno (evento) que o originou (WATSON; ARRILLAGA, 2007).

Quando se projeta um sistema de proteção é muito importante conhecer a origem do fenômeno eletromagnético, como também a faixa de frequências na qual o fenômeno pode ser identificado (RIES, 2007). A Tabela 1 apresenta os fenômenos transitórios que poderiam acontecer em um SEP, identificando a faixa de frequência nas quais os sinais transitórios se apresentam (POVH et al., 1993).

**Tabela 1** Eventos transitórios em SEP e suas frequências associadas.

Evento Transitório	Faixa de Frequência
Energização de transformadores e ferro-ressonância	(DC) 0,1 Hz – 1 kHz
Rejeição de carga	0,1 kHz – 3 kHz
Remoção de faltas	50/60 Hz – 3 kHz
Falta inicial	50/60 Hz – 20 kHz
Energização de linhas	50/60 Hz – 20 kHz
Reenergização de linhas	(DC) 50/60 Hz – 20 kHz
Tensão de restabelecimento transitória:	
Faltas em terminais	50/60 Hz – 20 kHz
Faltas de curta distância	50/60 Hz – 100 kHz
Fechamento múltiplo de disjuntor	10 kHz – 1 MHz
Surtos atmosféricos e faltas em subestações	10 kHz – 3 MHz
Faltas em GIS ( <i>Gás Insulated Switchgear</i> )	100 kHz – 100 MHz

Fonte: adaptação de (POVH et al., 1993).

(MARTINEZ; MORCK, 2005) salienta que, no caso particular de proteção de transformadores, deve ser levado em consideração que este equipamento apresenta determinadas características de comportamento em função da faixa de frequência na qual encontra-se operando. Por isso, o modelo de transformador a ser utilizado na avaliação de sistema de proteção deve ser escolhido adequadamente objetivando representar corretamente as características desse equipamento nas frequências geradas pelos eventos analisados. Segundo (MARTINEZ; MORCK, 2005) os fenômenos de energização e ferro-ressonância geram sinais transitórios na faixa das baixas e altas frequências (0 – 10 kHz) e, portanto, a curva de magnetização, o laço de histerese, os efeitos dependentes da frequência e as capacitâncias dos circuitos como um todo (bancos de capacitores, linhas de transmissão e distribuição) são informações importantes para a análise da ocorrência desses fenômenos transitórios. Já para as frequências altas (acima de 10 kHz), os efeitos capacitivos tornam-se relevantes no comportamento do transformador e o modelo utilizado deve considerar esses efeitos. As não-linearidades e os parâmetros dependentes da frequência dos materiais empregados na construção do

transformador não têm grande influência para as altas frequências podendo ser desconsiderados na modelagem (MARTINEZ; MORCK, 2005).

## 2.2 Tipos de Falhas em Transformadores

Na filosofia de proteção de determinados componentes dos SEP como, por exemplo, nas linhas de alta tensão, a velocidade de resposta dos relés de proteção é muitas vezes priorizada objetivando preservar a integridade do sistema elétrico como um todo, onde a limitação dos danos para o equipamento é um benefício secundário. No caso dos TDP, no entanto, o alto custo de reparação e/ou substituição, bem como a possibilidade de uma falha ou incêndio envolvendo equipamentos adjacentes, faz com que a limitação dos danos perante uma falha seja o objetivo principal do sistema de proteção (IEEE Std. C37.91<sup>TM</sup>, 2008). Nesse sentido, as particularidades de cada tipo de falta determinam as condições necessárias para o dimensionamento e definição do tipo de proteção a ser utilizado em determinado equipamento e, portanto, dos sensores responsáveis pela sua detecção.

As faltas nos SEP podem ser do tipo permanente, ou seja, após a abertura do disjuntor não poderá ser restabelecido o fornecimento de energia até a falta ser isolada ou reparada, ou podem ser do tipo transitórias (temporárias) onde após a atuação da proteção a energia é restabelecida sem maiores consequências. Segundo (FLACH, 2008) os possíveis danos causados por uma falta permanente são: danos no equipamento causando destruição e fogo, explosões em equipamentos contendo isolamento a óleo, sobreaquecimento dos equipamentos, subtensões e sobretensões na vizinhança da falta, interrupção no fluxo de potência, redução das margens de estabilidade, operações incorretas devido a desequilíbrios do sistema e queda do sistema por perda de sincronismo. Por outro lado, os principais tipos de faltas que afetam os transformadores e autotransformadores podem ser classificados, quanto à natureza elétrica, conforme os seguintes grupos (FLACH, 2008):

1. curtos-circuitos entre fase (internos e nos terminais externos);
2. curtos-circuitos entre fases e neutro;
3. curtos-circuitos entre espiras;
4. defeitos a terra envolvendo os enrolamentos ou os terminais externos.

Os defeitos mais frequentes nos transformadores são aqueles que envolvem os terminais e as espiras. Quanto às características das falhas, as mesmas podem ser divididas entre falhas de ocorrência rápida (ou repentina) e falhas de ocorrência lenta (ou incipientes). O primeiro tipo de falha, de ocorrência repentina, precisa ser detectada no menor tempo possível objetivando minimizar as consequências sobre o equipamento, bem como o tempo de recuperação/reparo do mesmo. Quanto às falhas incipientes, podem ser diagnosticadas através de procedimentos e ações programadas tais como análise do gás ou do óleo e/ou análise de resposta em frequência (FLACH, 2008).

A falta com maior dificuldade de detecção em um transformador é a que envolve uma ou duas espiras. Uma falta do tipo espira-espira resulta em mudanças da corrente terminal muito menores do que a corrente de carga nominal. Por exemplo, aproximadamente 10% das espiras devem estar em curto-circuito para gerar um fluxo de corrente semelhante à corrente a plena carga. Assim, uma falha monofásica do tipo espira-espira resultaria em uma mudança imperceptível da corrente nos terminais do transformador (IEEE Std. C37.91<sup>TM</sup>, 2008). Este fato leva às técnicas de detecção de faltas apresentarem dificuldades quando da identificação de faltas incipientes.

A intensidade das grandezas elétricas (tensão e correntes terminais) pode ser considerada na identificação de possíveis defeitos ou condições anormais de operação do transformador.

Assim, o comportamento destas grandezas geralmente pode ser utilizado para identificar o tipo de defeito, como por exemplo:

- correntes elevadas (superiores à nominal): defeitos terminais ou externos ao transformador;
- correntes de baixa intensidade: (da ordem de até 10% da corrente nominal): defeitos entre espiras;
- presença de correntes de sequencia zero acima de um determinado limiar: defeitos envolvendo a terra.

Por outro lado, o enrolamento e o núcleo magnético dos transformadores estão sujeitos a um número determinado de diferentes forças durante a operação, por exemplo: expansão e contração devido a ciclos térmicos, vibração, aquecimento local devido ao fluxo magnético, forças eletromagnéticas devido ao fluxo de corrente de falta, aquecimento excessivo devido à sobrecarga ou inadequada refrigeração. Estas forças podem provocar danos no isolamento elétrico dos enrolamentos (IEEE Std. C37.91<sup>TM</sup>, 2008).

### 2.2.1 Projeto de Sistemas de Proteção

Os SEP são concebidos objetivando gerar, transmitir e distribuir energia elétrica dentro de determinados patamares e padrões de estabilidade e continuidade. No entanto, devido à ocorrência de faltas elétricas durante a operação dos SEP estes padrões de qualidade podem não ser atingidos pelo sistema elétrico ocasionando descontinuidades no fornecimento de energia (e levando insatisfação aos clientes).

Projetar um sistema de proteção que antecipasse os efeitos de todos os tipos de falta é de difícil construção. Assim, é tradicional projetar um sistema de proteção que simplesmente minimize as consequências das falhas isolando o equipamento defeituoso o mais rápido possível. Nesse contexto, a tarefa básica de todo relé e esquema de proteção é operar corretamente as chaves interruptoras de energia objetivando isolar somente a parte do sistema elétrico (ou equipamento) com falha o mais rápido possível, minimizando os problemas e danos causados pelas faltas quando ocorrerem.

O poder destrutivo de uma falta com alta corrente de curto-circuito é muito grande. A corrente de curto-circuito em um transformador pode desde queimar os condutores de cobre até soldar as laminações do núcleo em um tempo muito curto. Neste sentido, podemos dizer que um sistema de proteção deve ser sensível, ou seja, a sua corrente mínima de operação deverá ser baixa. Relativamente à proteção diferencial, assunto principal deste estudo, para contemplar os efeitos de saturação de TCs e mudanças de *tap*, alterações da corrente mínima de operação são previstas a partir da adoção de taxas de inclinação atribuídas à sua característica de operação. Outras características importantes associadas ao desempenho da proteção são apresentadas em (FLACH, 2008).

### 2.3 Métodos de Proteção de Transformadores

Segundo (IEEE Std. C37.91<sup>TM</sup>, 2008) não há nenhum padrão de proteção que possa ser aplicado a todos os transformadores, ou até mesmo em aplicações diferentes. A maioria das instalações precisa de uma análise de engenharia individual para determinar o melhor esquema que contemple a relação custo-benefício de cada sistema de proteção. Geralmente, mais de um esquema de proteção é tecnicamente viável, e cada alternativa oferece diferentes graus de sensibilidade, seletividade e velocidade. O esquema escolhido deve equilibrar a melhor combinação desses fatores minimizando: o custo de reparação, custo de perda de produção, os efeitos adversos sobre o equilíbrio do sistema, a propagação de danos a equipamentos adjacentes e o tempo de indisponibilidade do equipamento danificado.

Na proteção de transformadores a proteção de retaguarda (*backup*) precisa ser sempre considerada. Quando uma falha na zona de proteção do transformador não é eliminada pelo sistema de proteção primário, relés de retaguarda devem operar objetivando a reparação factível do transformador faltoso.

Devido à importância dos TDP dentro da estrutura dos SEP diversas técnicas de proteção foram desenvolvidas, as quais podem ser classificadas em dois grandes grupos: a proteção contra os efeitos de faltas que ocorrem em qualquer parte do sistema e a proteção contra faltas internas ao transformador (HEATHCOTE, 2007).

Os sistemas de proteção contra distúrbios externos ao transformador têm por objetivo evitar que os efeitos provoquem algum tipo de desgaste no equipamento, sejam estes mecânicos ou elétricos. Estes distúrbios podem ser agrupados em três segmentos:

1. curtos-circuitos.
2. sobretensões (distúrbios de alta frequência incluindo as descargas atmosféricas).
3. ferorrressonância.

Quando uma falta interna ocorre, imediatamente o transformador deve ser desconectado, tanto para diminuir a extensão dos danos quanto para preservar o SEP como um todo. Existem três tipos principais de sistemas de proteção que são utilizados para a detecção destas faltas: a proteção de sobrecorrente para as correntes de fase, proteção diferencial para as correntes diferenciais e o acumulador de gás (relé de Buchholz) ou relé de pressão súbita para faltas internas com produção de arco elétrico (HARLOW, 2007).

A proteção de sobrecorrente com fusíveis ou relés digitais promove um primeiro tipo de proteção contra falhas em transformadores, podendo ser aplicada em equipamentos de pequena capacidade como proteção primária e/ou como proteção de retaguarda para relés diferenciais, ou de pressão em transformadores maiores. O princípio diferencial para a proteção de transformadores foi introduzido pela conexão do relé de sobrecorrente de tempo inverso em paralelo com os secundários dos Transformadores de Corrente (TCs). Sendo assim, os TCs são ligados de tal forma que a saída para o relé seja a diferença entre a corrente de entrada e a corrente de saída do TDP. Este tipo de proteção é comumente utilizada em transformadores de aproximadamente 10 MVA e acima, já que excelentes resultados são providos por esta metodologia, proporcionando uma maior segurança, principalmente para situações de faltas externas (HARLOW, 2007; ABNT NBR 8926, 1985).

Por outro lado, (STRINGER; DALKE, 2000) advogam o uso da proteção diferencial de terra para transformadores e geradores aterrados através de impedância. Por causa de sua seletividade inerente e velocidade de operação, a proteção diferencial de terra fornece uma excelente proteção contra faltas envolvendo a terra. Contudo, vários fatores devem ser considerados quando a proteção diferencial de terra é aplicada a equipamentos de um SEP. Esses fatores incluem o tipo e característica do equipamento a ser protegido.

Sistemas de proteção que monitoram outros parâmetros do transformador podem ser utilizados para detectar faltas incipientes. Assim, uma rápida resposta a estes indicadores pode ajudar a evitar uma falha grave. Alguns exemplos de ações que ajudam a detectar condições indesejáveis de funcionamento são (IEEE Std. C37.91<sup>TM</sup>, 2008; HARLOW, 2007):

- a. Monitoração da temperatura do bobinado ou do óleo são tipicamente usados para inicializar um alarme exigindo investigação para as equipes de manutenção. Nesta fase, os operadores podem começar a reduzir a carga no transformador para evitar atingir uma condição em que a desconexão do transformador seja necessária.
- b. Os relés de detecção de gás podem detectar a evolução dos gases dentro do óleo no interior do transformador. A análise da composição dos gases indica o mecanismo que causou a formação de gás, por exemplo, acetileno pode ser causado por arco elétrico,

outros gases são causados por descarga parcial e degradação térmica do isolamento de celulose. Os relés de detecção de gás podem ser utilizados para operar ou para gerar um alarme dependendo da aplicação prática. Geralmente, a análise de gases é realizada em amostras de óleo que são recolhidas periodicamente.

- c. Relés de pressão súbita respondem às ondas de pressão no óleo do transformador causada pela evolução do gás associado à formação de arco elétrico.
- d. Relés de pressão súbita no espaço de gás respondem a mudanças bruscas de pressão no gás devido à evolução do gás provocado por um arco elétrico.
- e. Os sensores de nível de óleo monitoram o nível de óleo no tanque do transformador gerando um alarme para reduções menores ou atuando para reduções bruscas de nível.
- f. Dispositivos “*on-line*” para monitoramento das buchas de transformadores. TCs instalados nas buchas e para-raios são instalados nos transformadores geram um sinal de alarme quando uma reparação urgente faz-se necessária.

As principais funções oferecidas por relés digitais disponíveis no mercado são indicadas na Tabela 2, onde muitas destas funções estão agrupadas em um único relé de proteção.

**Tabela 2** Principais funções da proteção digital de transformadores.

<b>Função (ANSI)</b>	<b>Descrição da Função</b>
24	Proteção Volts-Hertz (V/Hz) ou de Sobre-excitação
46	Proteção de sobrecorrente de sequência negativa
49	Proteção de sobrecarga
50/51	Proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada –fase
50/51G	Proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada –terra
50/51N	Proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada –neutro
59	Proteção de sobretensão
63	Proteção de pressão
67/67G	Proteção direcional de sobrecorrente de fase/terra
81U	Proteção de subfrequência
87T	Proteção diferencial percentual com restrição de harmônicos
87/50	Proteção de sobrecorrente diferencial instantânea (sem restrição)
87G	Proteção diferencial restrito à terra

Fonte: adaptação de (IEEE Std. C37.91<sup>TM</sup>, 2008).

Vale salientar que os relés digitais, quando comparados com os relés analógicos, reduzem o impacto dos efeitos da saturação dos TCs dado que representam cargas menores para o secundário do mesmo. Transformadores com potências menores a 2,5 MVA são geralmente protegidos com fusíveis. Por outro lado, a sensibilidade da proteção utilizada em transformadores com potências de até 5 MVA pode ser melhorada utilizando relés de sobrecorrente instantâneos e temporizados. Já nos transformadores com potência nominal de 5 até 10 MVA é recomendável o emprego de relés diferenciais. Para transformadores acima de 10 MVA, se recomenda utilizar relés diferenciais com restrição de harmônicas em conjunto com relés de pressão e sensores de temperatura (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

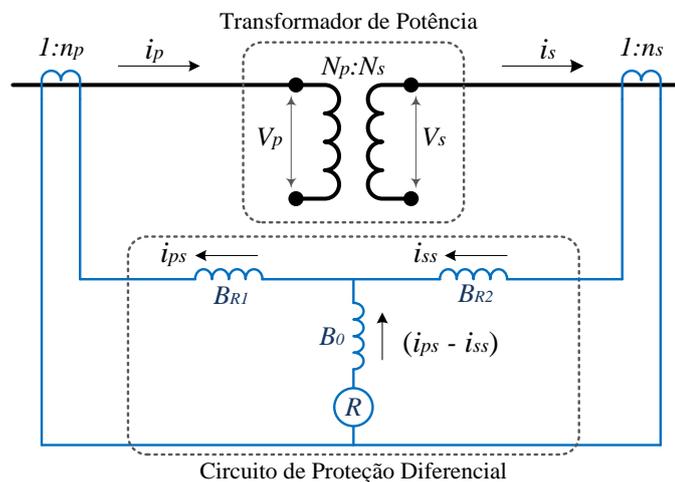
Embora existam diversas técnicas para a proteção de transformadores de potência, o foco primordial deste trabalho é o estudo e a análise da proteção diferencial percentual a qual será apresentada a seguir.

## 2.4 Filosofia de Proteção Diferencial

Dentre as inúmeras publicações disponíveis na área de proteção de SEP, (PAINTHANKAR, 1998) faz referência aos diferentes esquemas de proteção utilizados para os principais equipamentos e, em particular, ao esquema de proteção diferencial convencional e de proteção diferencial percentual. Princípios e aplicações da proteção diferencial numérica são apresentados em (ZIEGLER, 2012).

A filosofia de proteção diferencial tem sido aplicada em SEP desde o fim do século 19, sendo um dos primeiros sistemas de proteção utilizados nesta área. Essa filosofia aplica-se geralmente aos TDP, barramentos, grandes motores e geradores, linhas de transmissão que empregam sistemas de tele-proteção, reatores, entre outros (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

A Figura 1 mostra um esquema simplificado da proteção diferencial de transformadores com o esquema de conexão dos TCs acoplados em série aos ramais primários e secundários. Os relés diferenciais possuem uma grande variedade de tipos, dependendo do equipamento que eles protegem. A função dos TCs na filosofia de proteção diferencial é transformar as correntes oriundas do sistema de potência para valores de baixa amplitude e fornecer isolamento galvânico entre a rede elétrica e os relés de proteção e outros instrumentos ligados ao seu secundário. Nesta figura  $N_p:N_s$  é a relação de transformação entre o primário e secundário do transformador de potência protegido,  $1:n_p$  e  $1:n_s$  são as relações de transformação dos TCs instalados nos ramais primário e secundário,  $B_{R1}$  e  $B_{R2}$  são as bobinas de restrição do primário e secundário,  $B_0$  é a bobina de operação do relé de sobrecorrente e  $V_p$  e  $V_s$  são as tensões no bobinado primário e secundário respectivamente.



**Figura 1** Conexões básicas de um sistema de proteção diferencial de transformadores.

Neste tipo de proteção, as falhas são detectadas através da comparação de correntes que fluem dentro e fora da zona de proteção, onde se encontra o elemento protegido. A zona de proteção é definida como a região abrangida pelos TCs em ambos os lados do equipamento protegido. Em alguns casos, a zona de proteção do relé diferencial pode ser estendida para incluir outros componentes próximos ao transformador, atuando assim como uma proteção de retaguarda para os componentes, onde se exige uma sensibilidade bem menor do relé em comparação com o relé específico que faz a proteção do equipamento (DOS SANTOS, 2006).

Assim, a corrente diferencial dada pela diferença fasorial entre as correntes secundárias dos TCs, ditas  $i_{ps}$  e  $i_{ss}$ , é monitorada constantemente pelo relé de sobrecorrente “R” que desconecta o transformador caso a corrente diferencial seja maior que um valor limiar (*pickup*) previamente definido.

Quando o transformador estiver operando em condições normais ou perante falta externa, as correntes provenientes dos secundários dos TCs não produzirão corrente diferencial suficiente para sensibilizar o relé “R”, uma vez que as correntes passantes no primário e no secundário do transformador serão as mesmas ( $i_{ss} \approx i_{ps}$ ). Todavia, se existir uma fuga de corrente na região protegida originando, por exemplo, por uma falta interna, a corrente diferencial não será nula o que poderá sensibilizar o relé e, conseqüentemente, o sistema de proteção ira isolar o transformador do SEP.

#### 2.4.1 Proteção Diferencial Percentual

O relé diferencial percentual segue essencialmente a mesma filosofia de proteção apresentada anteriormente, no entanto, possui um circuito diferencial que adiciona maior robustez à sensibilização por pequenas correntes diferenciais, uma vez que as bobinas de retenção permitem uma variação nos limiares de atuação (ANDERSON, 1999).

Como observado na Figura 1, dentro da zona do circuito de proteção diferencial, duas correntes podem ser definidas:

- Corrente de restrição: denotada como  $I_{RT}$  e cujo nome se relaciona com o torque de restrição imposto por esta corrente ao movimento do disco dos antigos relés diferenciais eletromecânicos. Esta corrente percorre as bobinas de restrição ( $B_{R1}$  e  $B_{R2}$ ) do circuito diferencial;
- Corrente de operação: denotada como  $I_{OP}$  representa a corrente que gera um torque de operação nos discos dos relés eletromecânicos. Esta corrente flui pela bobina de operação ( $B_O$ ) conectada em série como o relé de sobrecorrente “R”.

As magnitudes destas duas correntes,  $I_{RT}$  e  $I_{OP}$ , são tipicamente utilizadas para determinar se o relé diferencial irá ativar ou restringir a sua operação através do monitoramento constante das correntes provenientes dos secundários dos TCs. Desta forma, o relé diferencial percentual compara as correntes de restrição com as correntes de operação antes de efetuar a sua operação. A corrente de operação é determinada pela diferença entre as correntes secundárias dos TCs conectados no circuito diferencial, conforme a equação a seguir:

$$I_{OP} = \vec{i}_{ps} - \vec{i}_{ss} \quad (2.1)$$

Por outro lado, há varias alternativas para obter o valor da corrente de restrição, como apresentado a seguir (IEEE Std. C37.91, 2008):

$$I_{RT} = \delta \left| \vec{i}_{ps} + \vec{i}_{ss} \right| \quad (2.2)$$

$$I_{RT} = \delta \left( \left| \vec{i}_{ps} \right| + \left| \vec{i}_{ss} \right| \right) \quad (2.3)$$

$$I_{RT} = \text{Max} \left( \left| \vec{i}_{ps} \right|, \left| \vec{i}_{ss} \right| \right) \quad (2.4)$$

onde,  $\delta$  é um fator de compensação geralmente tomado como 1 ou 0,5.

Neste trabalho foi utilizada a equação 2.3 para o cálculo da corrente de restrição e foi adotado um valor de 0,5 para o fator de compensação  $\delta$  visando considerar o valor médio das correntes secundárias dos TCs. Nestas condições, quando uma falta externa ao transformador

de potência acontece, as correntes  $i_{ps}$  e  $i_{ss}$  que percorrem o relé de sobrecorrente  $R$  apresentam módulos iguais e distintos sentidos de circulação levando à corrente de restrição do relé a ficar como sendo  $I_{RT} = i_{ps} = i_{ss}$ . Ainda, a corrente de operação do relé dada pela equação 2.1 é igual a zero pelo fato de que as correntes  $i_{ps}$  e  $i_{ss}$  são de igual módulo e de sentidos opostos. Assim, ambas as correntes determinam as condições de “não operação” para o relé. Porém, quando uma falta interna acontece, por exemplo, no secundário do transformador a corrente  $i_{ss}$  muda o sentido de circulação acrescentando o valor da corrente de operação e sensibilizando a operação (*trip*) do relé.

A corrente de operação ( $I_{OP}$ ) atinge valores consideráveis quando uma falta interna acontecer e, por outro lado, é aproximadamente zero para quaisquer outras condições de operação do transformador. Assim, se houver uma situação faltosa no transformador, o relé de proteção  $R$  será sensibilizado e o sistema de proteção isolara o TDP do sistema elétrico.

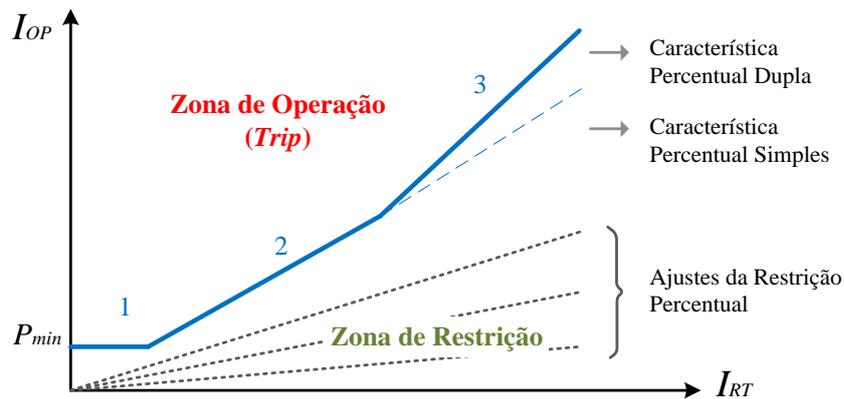
#### 2.4.2 Características de Operação do Relé Diferencial Percentual

Para conseguir um funcionamento correto do esquema de proteção diferencial é preciso realizar ajustes nas relações de transformação (*taps*) do TDP, assim como nos TCs. Devido a erros encontrados no processo produtivo dos transformadores e às propriedades físicas dos materiais magnéticos utilizados, pequenas correntes diferenciais podem estar presentes na bobina de operação do relé. Diante disso, adota-se uma margem de segurança para a corrente de operação que determina um nível mínimo de corrente diferencial a partir do qual o relé deverá atuar. Essa margem de corrente de operação é fixada através da especificação do fator  $k$ , chamado “característica diferencial percentual”, e pode ser definida como (HARLOW, 2007; HOROWITZ; PHADKE, 2008):

$$I_{OP} \geq k \cdot I_{RT} \quad (2.5)$$

A Figura 2 ilustra uma curva característica típica de operação do relé diferencial, incluindo as zonas de operação e restrição. O fator  $k$  representa a inclinação da característica percentual diferencial do relé de sobrecorrente e geralmente é expresso em forma percentual cujos valores típicos de ajuste são: 10, 20 e 40 % sendo que um relé com ajuste de 10 % é mais sensível que um relé com ajuste de 40 %. Estes ajustes da restrição percentual são necessários objetivando considerar correntes diferenciais geradas por: erros de exatidão dos TCs conectados no primário e secundário do TDP, correntes de excitação do transformador, mudanças de *tap* com carga e erros nas relações de transformação dos TCs (HOROWITZ; PHADKE, 2008). No entanto, vale salientar que os engenheiros de proteção ajustam os relés em função dos dados proporcionados pelos fabricantes dos transformadores e considerando parâmetros de seletividade com outros elementos de proteção do sistema elétrico ao qual o TDP se encontra conectado.

Na Figura 2 observam-se três inclinações distintas para a característica percentual. A região (1) representa o valor de *pickup* de corrente de operação mínima ( $P_{min}$ ) abaixo do qual o relé não deve operar. Este valor é baixo e geralmente se utiliza 0,25 Amperes (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Segundo (GUZMÁN et al., 2001), na prática é comum o emprego de duas inclinações diferentes, sendo que a primeira inclinação, região (2), é mais sensível e utilizada para baixas correntes de carregamento já que o erro introduzido pelos TCs é menor. A região (3) é menos sensível e seu objetivo é acomodar os maiores erros introduzidos pelos TCs devido às altas correntes de carga e possível saturação em condições de faltas externas.



**Figura 2** Curva característica de operação do relé diferencial (adaptado de HARLOW, 2007).

Todavia, não apenas a saturação dos TCs provoca a atuação errônea dos relés diferenciais com restrição harmônica e outras possíveis fontes de erro podem ser citadas (HARLOW, 2007):

1. variação da relação de transformação do TDP devido a mudança de *tap*;
2. correntes de magnetização criadas pelos transitórios devido à energização;
3. correntes de excitação causadas pela sobre-excitação do transformador;
4. rejeição de cargas;
5. correntes de magnetização criadas pelos transitórios originados pela energização solidária de transformadores em paralelo (*Sympathetic Inrush*).

Segundo (HARLOW, 2007) o relé diferencial com característica percentual típica com restrição harmônica soluciona os problemas relacionados ao fenômeno *inrush* e sobre-excitação de forma eficiente. Este problema é tradicionalmente resolvido pelo relé monitorando o valor da 2ª e 5ª harmônica e restringindo a operação do relé caso essas componentes ultrapassem um determinado limiar. Por outro lado, o problema de defasamento angular propiciado pelo transformador delta-estrela pode ser solucionado pela forma da conexão dos TCs ou, numericamente pelos relés digitais. Todavia, a discriminação entre correntes de faltas e correntes derivadas da energização, sobre-excitação e energização solidária de TDP configuram problemas mais complexos que devem ser analisados.

## 2.5 Fenômenos não Faltosos que Geram Correntes Diferenciais

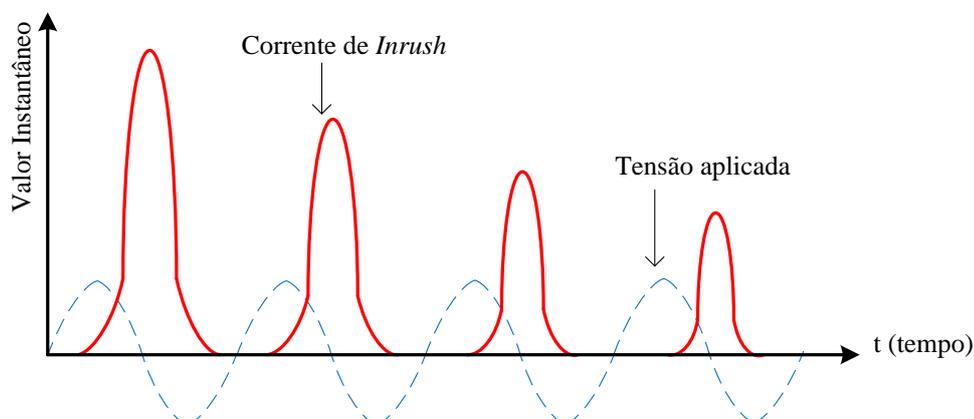
Em circunstâncias reais encontradas no dia-a-dia nos SEP identificam-se situações nas quais determinados fenômenos físico-elétricos e determinadas manobras operacionais podem causar a manifestação de correntes diferenciais, mesmo quando não há ocorrência de uma falta interna no transformador. Essas situações são muito frequentes nos TDP e o relé diferencial deve ser compensado objetivando prevenir uma operação incorreta.

A seguir, são apresentados alguns dos eventos que podem causar correntes diferenciais não relacionadas com faltas internas no transformador, destacando-se entre elas o fenômeno de energização que provoca as chamadas “correntes de *inrush*”.

### 2.5.1 Correntes de Magnetização Durante a Energização do Transformador

No momento em que um transformador é energizado, correntes diferenciais são geradas na bobina de operação do relé de proteção devido ao fenômeno de magnetização do núcleo. A magnitude dessa corrente é definida pela inclinação da característica de magnetização na região de saturação e pela indutância de dispersão do transformador (HOROWITZ;

PHADKE, 2008). Essas correntes são conhecidas como “correntes de *inrush*” e apresentam-se como picos transitórios cuja amplitude pode provocar a atuação do relé de proteção. A Figura 3 ilustra uma forma de onda típica da corrente de energização.



**Figura 3** Forma de onda típica da corrente de energização (IEEE Std. C37.91, 2008).

Segundo (EBNER, 2007) quanto maior é a potência do transformador, maior será a probabilidade de falha por causa deste fenômeno. Durante a manobra de energização, a amplitude da corrente de *inrush* pode exceder entre 10 e 20 vezes o valor da corrente nominal do transformador (LING; BASAK, 1988). Após isso, devido às perdas do circuito elétrico do transformador, a sua amplitude decresce atingindo o seu valor de estado permanente após alguns segundos. As correntes de *inrush* são transitórias, têm uma alta componente DC (corrente contínua) e são ricas em componente de 2ª harmônica (características utilizadas para restringir a operação dos relés diferenciais) o que afeta a qualidade da energia fornecida pelo transformador (EBNER, 2007).

Vale salientar que a amplitude e duração da corrente de *inrush* dependem, entre outros, dos seguintes fatores (ANDERSON, 1999):

- tamanho do transformador (ou banco de transformadores);
- nível de tensão no SEP quando o transformador é energizado;
- resistências equivalentes do SEP desde a fonte equivalente até o transformador;
- tipo de material utilizado na construção do núcleo do transformador;
- história magnética do núcleo de ferro-silício do transformador e existência de fluxo residual no mesmo.

Um relé diferencial percentual projetado para aplicação na proteção de transformadores deve ter a sensibilidade suficiente para distinguir entre uma condição de energização e uma falta interna. Segundo (ANDERSON, 1999) alguns dos métodos utilizados para evitar um desligamento indesejado do transformador são: supervisão através de relés de tensão, temporização do relé diferencial (*time delay*), diminuição da sensibilidade do relé diferencial durante o instante de energização e restrição de componentes harmônicos (o método de proteção mais utilizado na atualidade é o relé diferencial percentual com restrição de componentes harmônicas).

As correntes diferenciais decorrentes de casos de energização de transformadores estão compostas por elevadas componentes harmônicas de 2ª ordem enquanto que para situações de falta interna ao transformador estas correntes apresentam basicamente componentes de frequência fundamental. No entanto, existe a possibilidade de que componentes de 2ª harmônica estejam presentes quando da ocorrência de faltas internas ao transformador devido a fatores como: saturação de TCs no caso de uma falta externa severa, existência de

capacitâncias *shunt* para ajuste de fator de potência em linhas de transmissão e capacitâncias distribuídas em linhas longas de alta tensão (MONSEF; LOTFIFARD, 2007). Essa situação faz com que o método de restrição de harmônicas utilizado pelo relé diferencial convencional não seja eficiente, justificando a utilização de outras técnicas de análise para o estudo deste fenômeno. Entre essas técnicas destaca-se o uso de ferramentas como: Elementos Finitos, Redes Neurais Artificiais e Lógica *Fuzzy* (WANG; BUTLER, 2001; ZAMAN; HOQUE; RAHMAN, 1996; YOUSSEF, 2004).

Vale salientar que a corrente de *inrush* tem influência significativa nos ajustes das proteções do transformador e também na coordenação e seletividade com outras proteções do sistema elétrico a este associado. A corrente de *inrush* também apresenta influência sobre a tensão gerada por um gerador síncrono quando opera em forma isolada. Segundo (PROESCHOLDT, 2006) percebe-se que quando acontece a energização do transformador há um afundamento na tensão gerada pela máquina devido à corrente drenada pelo transformador. Este afundamento pode ser considerado relevante dado que alguns relés, dependendo das configurações, podem atuar devido a uma subtensão imposta pela energização.

Segundo (HARLOW, 2007) as principais características da corrente de *inrush* são:

- geralmente contém componente DC, harmônicos pares e ímpares,
- tipicamente estão compostas por pulsos unipolares e bipolares separados por intervalos de corrente muito baixas,
- os picos de corrente unipolar decrescem lentamente. A constante de tempo é tipicamente maior que a do decaimento exponencial da componente DC de uma corrente de falta,
- o conteúdo da componente de 2ª harmônica inicia com um valor elevado e decresce a medida que a corrente de *inrush* vai diminuindo,

A corrente de magnetização ocorre no transformador sempre que a polaridade e amplitude do fluxo residual no núcleo do transformador não se correspondam (coincidam) com a polaridade e amplitude do valor instantâneo do fluxo de estado permanente durante o instante de energização. Embora a energização do transformador seja a causa típica das correntes de *inrush*, quaisquer transitórios no circuito do transformador de potência podem gerar estas correntes. Nesse sentido, é factível verificar que diversos fatores influenciam a amplitude e a duração das correntes de *inrush*, o que torna praticamente impossível a sua predição (HARLOW, 2007). A seguir, se apresentam os principais fatores que tem influencia sobre a corrente de *inrush* (KULKARNI; KHAPARDE, 2005):

a. Ângulo de chaveamento:

O ângulo de chaveamento representa o tempo no qual o interruptor de energização do transformador é fechado, determinando assim a amplitude da corrente de magnetização. Assim, a corrente de *inrush* será máxima quando o transformador seja ligado no ponto de tensão zero e será mínima quando o transformador for conectado no ponto de tensão máxima.

b. Densidade de fluxo residual:

O fluxo residual presente no transformador depende das características do material do núcleo e do fator de potência da carga no momento que este foi desconectado da rede elétrica. Deste modo, verifica-se que quanto maior for o fluxo residual maior será a corrente de *inrush* gerada no instante de energização. Além disso, deve-se considerar também a polaridade do fluxo residual em relação ao fluxo principal no momento de conexão do transformador à rede, dado que a mesma tem influencia no valor de pico da corrente de *inrush*.

c. Nível de tensão da rede:

O nível de tensão da rede à qual o TDP é conectado tem uma influência direta na corrente de magnetização. Assim, quanto maior for o nível de tensão de alimentação do TDP, maior será o fluxo e, conseqüentemente, a corrente de magnetização, uma vez que o fluxo magnético é diretamente proporcional à tensão máxima.

d. Resistência série:

A corrente de energização é predominantemente influenciada pela resistência do sistema ao qual o transformador está conectado. Esta resistência série apresenta um amortecimento para a corrente de *inrush* que faz com que a mesma experimente uma redução na amplitude inicial. Esta característica explica, por exemplo, porque os transformadores próximos às unidades geradoras possuem, geralmente, uma corrente de energização com maior amplitude e tempo de amortecimento mais lento.

e. Nível de saturação do núcleo:

É importante lembrar que a corrente de energização inicial é diretamente proporcional ao fluxo que circula fora do núcleo magnético, como por exemplo, pelo ar. Desta forma, quanto mais saturado estiver o ferro presente no núcleo do transformador, maior será a porção do fluxo total que se fechará através do ar, tornando a corrente de energização mais proeminente.

f. Modo de energização do transformador:

Segundo (RIBEIRO, 1982), se um transformador trifásico for energizado monofasicamente, a corrente de magnetização será inferior quando comparada à corrente correspondente a da sua conexão através de um disjuntor trifásico. Além disso, a corrente de energização em p.u.<sup>2</sup> do lado de Baixa Tensão (BT) do transformador é menor que a corrente de energização do lado de Alta Tensão (AT).

g. Energização sob carga:

Se o transformador for conectado com carga, os picos da corrente de magnetização serão afetados até certo ponto pelo fator de potência da carga. Quando este é energizado com uma elevada corrente de carga e fator de potência próximo ao unitário, o pico de corrente tende a ser menor, mas se o fator de potência for reduzido, o pico de corrente será maior. Os efeitos da saturação devido à energização sob carga de transformadores de potência são discutidos em (LIU; LIN, 2005).

### 2.5.2 Saturação de Transformadores de Corrente (TCs)

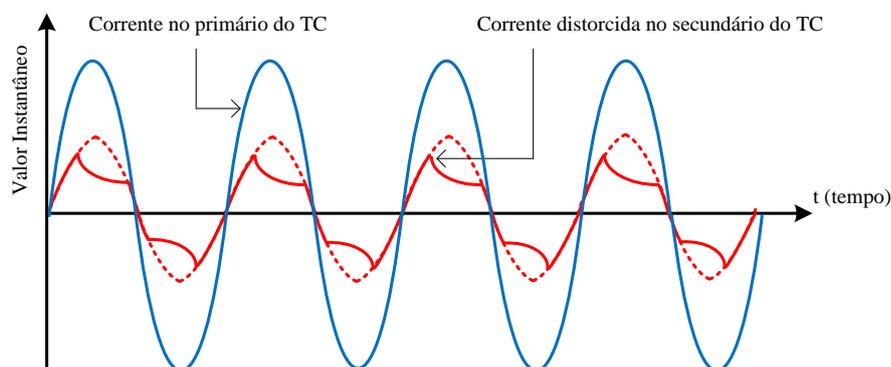
Um dos elementos críticos no esquema de proteção diferencial são os Transformadores de Corrente os quais trabalham em função de uma determinada curva de histerese. Para o seu correto funcionamento, os TCs são dimensionados para trabalhar na faixa linear da curva de saturação, entretanto, existem situações que causam sua saturação, como o nível de DC da corrente de curto-circuito e o fluxo residual no núcleo do TC. O núcleo de ferro dos transformadores apresenta uma capacidade de transmissão de fluxo magnético que depende diretamente das propriedades físicas dos materiais utilizados na construção destes núcleos os quais contribuem para que os transformadores fiquem susceptíveis ao fenômeno de saturação (KENNEDY, 1998). A saturação é provocada pelo aumento excessivo do fluxo magnético do núcleo que, por sua vez, é diretamente proporcional ao nível de tensão aplicada sobre os enrolamentos do transformador e inversamente proporcional à frequência do sistema elétrico (ANDERSON, 1999).

---

<sup>2</sup> O termo p.u. é utilizado para representar grandezas por unidade.

Dentro do esquema de proteção diferencial, os TCs têm a importante missão de transformar as correntes oriundas do sistema de potência em correntes equivalentes de baixa magnitude, objetivando facilitar sua medição. Além disso, os TCs devem fornecer isolamento galvânico entre a rede elétrica e os equipamentos conectados ao seu enrolamento secundário como, por exemplo, relés e/ou instrumentos de medição.

Em determinadas situações de operação dos SEP como, por exemplo, perante faltas externas próximas às buchas do transformador, as correntes de falta podem atingir valores de até 50 vezes a magnitude da corrente de carga nominal (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Nessa condição, a elevada corrente de falta pode saturar o núcleo magnético dos TCs e produzir uma distorção importante nas correntes secundárias dos mesmos (ANDERSON, 1999). Essa distorção pode gerar uma considerável corrente diferencial no relé de proteção, ocasionando uma atuação inadequada e comprometendo a eficiência do sistema de proteção. Desse modo, a possibilidade de saturação dos TCs deve ser criticamente considerada nos sistemas de proteção diferencial. A Figura 4 ilustra a forma de onda da corrente primária e secundária quando da ocorrência de saturação do TC onde se observa a distorção da corrente secundária a qual origina correntes diferenciais no relé de proteção.



**Figura 4** Forma de onda das correntes primárias e secundárias de um TC saturado.

A saturação dos TCs durante as faltas e seus efeitos nos relés tem recebido considerável atenção por parte dos pesquisadores e engenheiros de proteção. No caso da proteção diferencial de transformadores, a saturação do TC deve ser observada tanto em casos de faltas externas quanto em situações de falta interna. Nas faltas externas, a corrente diferencial gerada pela saturação dos TCs pode ser incorretamente interpretada pela filosofia de proteção adotada, ocasionando uma má operação dos relés. Já para as faltas internas, os harmônicos resultantes da saturação do TC podem atrasar a operação do relé diferencial, caso este tenha restrição de harmônica ou até mesmo bloquear a sua atuação (HARLOW, 2007).

Segundo (HARLOW, 2007), os TCs reproduzem satisfatoriamente a corrente do bobinado primário para um determinado tempo após o instante de inserção de uma determinada falta. Este tempo de saturação depende de vários fatores, mas normalmente pode ser considerado como sendo de 1 ciclo ou mais. Por outro lado, a saturação mais crítica do TC ocorre devido à componente assimétrica da corrente do primário. Durante o período da corrente contínua, a corrente do secundário pode conter um deslocamento assimétrico, além de componentes harmônicos pares e ímpares. Quando a componente assimétrica acaba, o TC possui somente a saturação em corrente alternada, caracterizada pela presença de componentes ímpares na corrente do secundário.

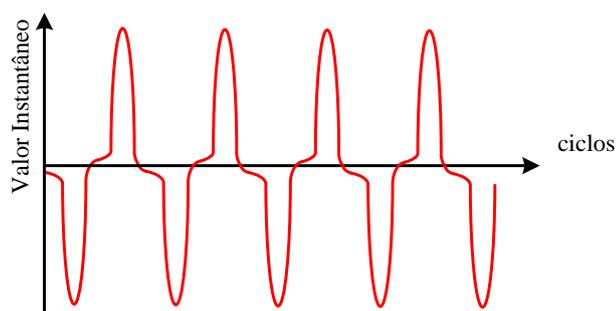
Na proteção diferencial de transformadores os TCs do lado de alta tensão são normalmente instalados nas buchas do transformador e requerem cabos longos para conexão com o relé. A relação mais baixa de correntes requerida no lado de alta tensão do transformador, associada aos cabos mais extensos, causa a saturação durante o *offset*, enquanto os TCs do lado de baixa

tensão, especificados de forma mais adequada, têm uma relação mais alta e permanecem lineares. Portanto, o relé detecta o segundo harmônico presente na falsa corrente diferencial e a proteção é bloqueada para situações de falta externa (BENMOUYAL; ZOCHOLL, 2002).

### 2.5.3 Sobre-Excitação de Transformadores de Potência

O fluxo magnético no núcleo de um transformador de potência é diretamente proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional à frequência operacional do transformador. Quando há condições de sobretensões e/ou sub-frequências que estão acima dos limites de projeto o fluxo magnético aumenta até saturar o núcleo do transformador. Perante esta condição as correntes no TDP apresentam um comportamento não-linear perante a variação do fluxo magnético. Essa não-linearidade das correntes é provocada pelo fenômeno de saturação magnética do núcleo (HARLOW, 2007). O fenômeno de sobre-excitação reflete-se nos transformadores através de mudanças consideráveis na temperatura e nas vibrações do núcleo (com aumento substancial das perdas magnéticas e do nível de ruído), levando à necessidade de desconectar rapidamente o equipamento do sistema elétrico para evitar danos maiores. Além disso, a sobre-excitação gera ruídos, aumento da corrente de excitação e vibrações (KENNEDY, 1998).

Durante o fenômeno de sobre-excitação, ocorrem distorções de 3ª e 5ª harmônicas nas formas de onda de corrente, que podem gerar um aumento na corrente diferencial que percorre o relé (ANDERSON, 1999; GUZMÁN et al., 2001). Assim, a terceira e quinta harmônica se apresentam como grandezas confiáveis para detectar e discriminar condições de sobre-excitação. Na prática, o monitoramento das componentes de 5ª harmônica das correntes diferenciais é utilizado na discriminação do fenômeno de sobre-excitação em transformadores. Caso esses valores excedam um limiar pré-estabelecido, o relé pode bloquear a sua operação ou considerar uma nova inclinação (sensibilidade) possibilitando um aumento na margem de tolerância do dispositivo de proteção. Embora tal condição operativa possa ocorrer em quaisquer partes do SEP e causar danos ao transformador, é difícil quantificar quais níveis de sobre-excitação podem ser tolerados, o que torna indesejada a atuação da proteção diferencial nestas situações. Assim, uma alternativa de proteção para tais situações é a utilização de relés V/Hz, os quais respondem à variação de tensão em função da frequência. Em outras palavras, a sobre-excitação de transformadores de potência é um caso típico de saturação em Corrente Alternada (CA) do núcleo que produz harmônicas ímpares na corrente de excitação (HARLOW, 2007). É importante salientar que o terceiro harmônico é o mais adequado para a detecção de condições de sobre-excitação, mas a conexão em delta dos TCs, ou a compensação da conexão em delta pelos filtros dos relés diferenciais retiram esse harmônico. O quinto harmônico, entretanto, ainda é um componente confiável que pode ser utilizado na detecção deste fenômeno (HARLOW, 2007). A Figura 5 mostra a forma de onda típica da corrente no primário do transformador para uma condição de sobre-excitação.



**Figura 5** Corrente de excitação de um transformador sobre-excitado (adaptado de: HARLOW, 2007).

#### 2.5.4 Remoção de Falhas Próximas ao Transformador

Quando uma falta externa próxima ao transformador é removida, surge uma situação similar àquela encontrada durante a energização desse equipamento. Nessa manobra, a tensão aplicada sob os enrolamentos do transformador passa de um valor de falta para um valor de pós-falta, e o fluxo concatenado muda proporcionalmente em função dessa variação de tensão. Dependendo do instante no qual a falta externa é removida, essa transição de um estado de falta a um estado de pós-falta faz que aconteça um deslocamento da componente de corrente contínua (DC) do fluxo concatenado. Desse modo, as formas de onda da corrente primária serão similares às correntes de *inrush* obtidas durante a energização do transformador. Deve ser notado que não existe fluxo remanescente no núcleo durante esse processo e, por tanto, a amplitude da corrente transitória gerada é menor que durante a energização do transformador (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

#### 2.5.5 Rejeição de Carga

Segundo (HOROWITZ; PHADKE, 2008), durante as rejeições de carga o transformador pode estar sujeito a sobretensões em regime permanente, dado que esse fenômeno está diretamente relacionado com a frequência e a tensão do sistema elétrico. Quando um sistema se encontra em estado estável (frequência de 60 Hz), a potência mecânica de entrada no eixo do gerador é igual à soma das cargas conectadas a este, somadas às perdas de potência reais no sistema. Qualquer interferência significativa nesse balanço causa uma mudança na frequência das grandezas elétricas geradas pela máquina (BRETAS; COSTA, 2000). Como consequência, tem-se que a enorme massa rotacional do rotor, conformada pela turbina e o gerador, atua como um depósito de energia cinética. Logo, quando existe um aumento de carga o rotor diminui a velocidade, suprimindo energia elétrica para o sistema. De modo oposto, quando há uma redução considerável da carga o eixo do gerador acelera absorvendo energia mecânica. Nessa condição, qualquer mudança na velocidade do gerador causa uma variação proporcional na frequência (BERNARDES, 2006).

Pode-se agora analisar a situação de rejeição de carga fazendo uma analogia com o transformador. Usualmente, os transformadores são projetados para operar perto do “joelho” da curva de saturação do núcleo magnético. Isso significa que qualquer sobretensão ou sub-frequência nos terminais do transformador irá causar um aumento, além do normal, no fluxo magnético que percorre o núcleo podendo resultar em um aumento substancial da temperatura do mesmo (ANDERSON, 1999). Nessas condições, o transformador pode ser submetido a formas de onda distorcidas, compostas por harmônicos ímpares, particularmente de 3° e 5° ordem. Desse modo, o transformador apresentará uma característica não-linear, gerando correntes diferenciais não nulas e, conseqüentemente, sensibilizando a proteção diferencial de forma indesejável.

#### 2.5.6 Diferenças nas Características dos TCs

Em uma aplicação de proteção diferencial de transformadores deve-se utilizar TCs de características similares em ambos os lados do transformador de potência (ANDERSON, 1999). Por exemplo, se ambos os TCs apresentam diferentes níveis de precisão, um aumento na carga secundária do TC com maior exatidão tenderá a equilibrar as diferenças nas características de precisão de ambos os TCs. Cabe salientar que, segundo (CAMINHA, 1997), um TC com secundário curto-circuitado apresenta uma diminuição nos erros de medição e, portanto, quanto menos dispositivos (relés de proteção, amperímetros, varímetros, medidor de fator de potência, etc.) se conectarem ao secundário do TC, menor será a carga e conseqüentemente maior será a exatidão do TC.

Por outro lado, desequilíbrios entre os *taps* dos TCs também podem gerar correntes diferenciais. Mesmo se um transformador tivesse uma relação de transformação fixa, é muito difícil fazer corresponder exatamente às relações de transformação dos TCs conectados no equipamento. Qualquer desequilíbrio entre os *taps* dos TCs gera fluxos de corrente no circuito de operação do relé diferencial. Se um transformador tem um comutador sob carga (LTC) a possibilidade de má operação é maior ainda (IEEE Std. C37.110<sup>TM</sup>, 2008).

A seleção imprópria de TCs pode resultar na saturação dos mesmos durante condições de falta que possam afetar a operação dos relés de proteção. Assim, sugere-se adotar um critério para seleção dos TCs para que os mesmos possam alimentar relés digitais instantâneos com bom desempenho (EL-AMIN; AL-ABBAS, 2006).

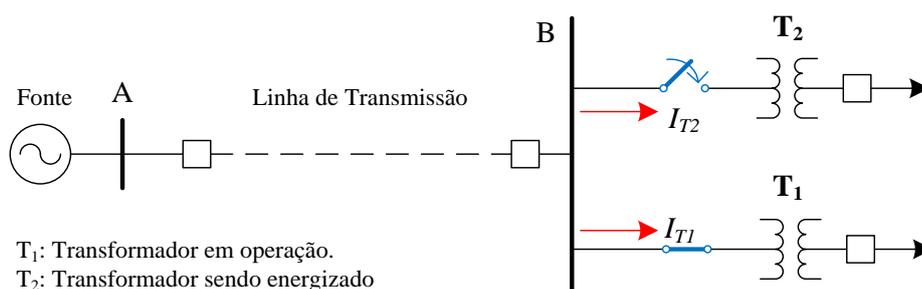
Por outro lado, pode haver uma defasagem entre as correntes primárias e secundárias conforme o tipo de ligação do transformador ou mudanças de *tap* (manual ou automática). As conexões dos TCs para proteção diferencial de um transformador de potência delta-estrela são relevantes. Devemos conectar os transformadores de corrente em delta no lado do enrolamento em estrela do transformador de potência e em estrela no lado do transformador em delta. Assim, podemos compensar a diferença de fase entre as correntes primárias e secundárias do transformador de potência. É importante salientar que os relés digitais diferenciais atuais, microprocessados, fazem a compensação automática da diferença angular que possa existir entre os lados de um transformador. Além disso, são programados para diferenciar os fenômenos resultantes da energização dos originados por faltas (FLACH, 2005).

### 2.5.7 Energização de Transformadores em Paralelo (Energização Solidária)

O termo energização solidária ou *sympathetic inrush* refere-se à condição de energização de transformadores que estão operando em paralelo. Nesta condição, as correntes de energização para ajuste dos relés de proteção são calculadas assumindo que os transformadores encontram-se trabalhando em forma isolada, ou seja, suprindo energia à carga sem ajuda de outro transformador conectado em paralelo. Segundo (SENGÜL et al., 2005; KULKARNI; KHAPARDE, 2005), é muito comum que os equipamentos que conformam os SEP sejam energizados em paralelo com os demais dispositivos o que geralmente provoca transitórios e sobretensões apreciáveis nos transformadores próximos.

A Figura 6 apresenta um circuito esquemático de dois transformadores conectados em paralelo. Ao conectar o transformador  $T_2$  à rede onde se encontra conectado e operando o transformador  $T_1$ , gera-se uma corrente de energização que flui para  $T_1$  e produz um fluxo de corrente contínua sobreposto ao fluxo de corrente alterna, próprio da magnetização. Esta condição operacional gera um aumento na densidade de fluxo e proporciona altas correntes de magnetização a  $T_1$ . Dependendo da amplitude do amortecimento da componente de corrente contínua, este fenômeno de energização solidária pode aumentar o nível de ruído emitido por  $T_1$  (e outros transformadores próximos) devido ao aumento da densidade do fluxo no núcleo (KULKARNI; KHAPARDE, 2005; HOROWITZ; PHADKE, 2008). Além disso, a energização solidária pode provocar um funcionamento incorreto da proteção associada a  $T_1$ , já que correntes diferenciais indesejadas podem ser geradas.

Durante a energização solidária, o decaimento das correntes  $I_{T1}$  ( $T_1$ ) e  $I_{T2}$  ( $T_2$ ) possui o mesmo valor médio e sinais opostos visto que a componente de corrente contínua da corrente solidária do transformador  $T_1$  irá balancear a componente de corrente contínua da corrente de energização do transformador  $T_2$ . Assim, a tensão no barramento B será simétrica e a mudança do fluxo por ciclo em  $T_1$  e  $T_2$  dependerá da queda de tensão na resistência dos enrolamentos de cada equipamento (BRONZEADO; YACAMINI, 1995).



**Figura 6** Esquematização do fenômeno de energização solidária (KULKARNI; KHAPARDE, 2005; HOROWITZ; PHADKE, 2008).

A duração e a amplitude das correntes de energização solidária são influenciadas por diversos parâmetros do SEP dentre os quais se destacam (WANG et al., 2008; KUMBHAR; KULKARNI, 2007):

- resistência serie equivalente do sistema elétrico;
- ângulo de chaveamento do transformador que está sendo energizado;
- nível de carregamento do transformador em operação;
- fluxo residual no transformador que está entrando em operação;
- existência de capacitor *shunt* no sistema ao qual o paralelismo está sendo utilizado.

## 2.6 Modelagem de Transformadores para Estudos de Fenômenos Transitórios

Os transformadores desempenham funções extremamente importantes dentro dos SEP. A transmissão e distribuição de energia elétrica não seriam possíveis sem a interligação das redes de diferentes níveis de tensão através desses equipamentos. De fato, a confiabilidade e durabilidade dessa máquina elétrica são fatores fundamentais na hora de planejar o fornecimento de energia aos consumidores.

Os transformadores são projetados e construídos de tal forma que, durante um estado de operação normal, trabalhem próximos ao joelho da curva de saturação magnética do núcleo de ferro. Essa situação faz com que o núcleo magnético apresente características não-lineares devido principalmente às perdas por histerese e às correntes induzidas. Como consequência disso, durante determinadas manobras de chaveamento (por exemplo, energização do transformador), correntes extremamente elevadas e distorcidas contendo um elevado número de harmônicas sejam registradas (CHEN; VENKATA, 1997).

Segundo (MARTINEZ; MORRIS, 2005) a representação de transformadores para simulação de transitórios eletromagnéticos pode ser bastante trabalhosa, tendo em vista o grande número de projetos de núcleos e o fato de que alguns parâmetros são tanto não-lineares quanto dependentes da frequência. Diante disso, as características físicas, cujo comportamento depende da frequência e que devem ser corretamente representadas na modelagem do transformador são: as configurações do núcleo e o tipo de enrolamento, as indutâncias próprias e mútuas entre os enrolamentos da alta e baixa tensão, o fluxo de dispersão, o efeito pelicular e efeitos de proximidade dos enrolamentos, a saturação magnética do núcleo, as perdas por histerese e por correntes induzidas e os efeitos capacitivos.

Vários modelos, com diferentes graus de complexidade, foram construídos e encontram-se disponíveis em *softwares* para simulação de transitórios eletromagnéticos no intuito de representar, o mais próximo possível, o comportamento dos transformadores (KEMA, 1988;

MORCHED; MARTI; OTTEVANGERS, 1993). No entanto, deve-se atentar para o fato de que muitos modelos necessitam de parâmetros cuja determinação depende da geometria dos enrolamentos e do núcleo do transformador. Tais informações normalmente não são disponibilizadas pelas empresas construtoras o que dificulta a correta modelagem do transformador e limita a utilização de determinados modelos existentes.

### **2.6.1 Considerações Para a Modelagem de Transformadores**

Segundo (MARTINEZ; MORK, 2005) a modelagem do transformador pode ser separada em duas partes, a representação dos enrolamentos e representação do núcleo de ferro. Embora essa separação seja feita, observa-se que ambas as partes são dependentes da frequência, tendo a representação do enrolamento uma característica linear e a representação do núcleo uma característica não-linear. Os três maiores efeitos que causam essa não-linearidade no núcleo são: a saturação, o efeito de histerese e as correntes induzidas. Para (MARTINEZ; MORK, 2005), cada uma dessas partes possui um papel diferente, dependendo do foco de estudo para o qual o modelo do transformador será utilizado. Por exemplo, a representação correta do núcleo é de extrema importância em simulações que envolvem os efeitos de ferro-ressonância, mas normalmente é desprezada em cálculos de fluxo de carga e cálculos de curto-circuito. Além disso, o mesmo autor salienta que o modelo de transformador para estudos de fenômenos transitórios de médias e altas frequências deve representar exatamente o núcleo do transformador, as indutâncias de dispersão, os efeitos das correntes de Foucault nos enrolamentos e no núcleo, a saturação magnética e os efeitos de histerese.

Nesse contexto (MARTINEZ; MORK, 2005) diz que o desenvolvimento de um modelo de transformador que inclua todos esses parâmetros e que ainda possa ser utilizado na simulação de transitórios para frequências abaixo de 10 kHz não é imediatamente óbvio. O trabalho computacional é considerável para os projetos de núcleos complicados e a determinação exata de todos os parâmetros é uma tarefa difícil, já que determinadas informações que fazem à construção do transformador não estão facilmente disponíveis.

Como colocado por (ZCERNORUCKI, 2007), o material ferromagnético do núcleo das máquinas elétricas possui características de funcionamento não-linear, e a sua modelagem através de parâmetros elétricos muitas vezes não contempla satisfatoriamente todos os fenômenos físicos. Diante disso, uma representação exata e completa do transformador só é possível utilizando um grande número de elementos elétricos dependentes da frequência e, ainda, precisa-se dos valores de indução magnética.

O uso de materiais dielétricos nos transformadores é de extrema importância, pois estes materiais cumprem as importantes funções de (HARLOW, 2007): isolamento elétrico, sustentação dos enrolamentos, entre outros. A conjunção desses materiais dielétricos e as partes com tensão do transformador apresentam-se como capacitâncias distribuídas ao longo da estrutura do transformador e a representação dessas capacitâncias são, além de importantes, necessárias para estudos de transitórios rápidos na faixa das altas frequências (acima de alguns kHz).

Contudo, os modelos simplificados podem ser suficientemente precisos para a simulação de alguns transitórios. Por exemplo, há muitos transitórios de baixas frequências nos quais a capacitância terminal não representa um papel importante. A histerese pode ser simplificada a um simples valor da curva de saturação para os casos onde o fluxo residual não tem efeito e a representação das perdas não é crítica. Os efeitos da corrente de Foucault sobre os enrolamentos e o núcleo de ferro podem ser representados por um circuito equivalente de baixa ordem para faixas de frequências inferiores a 10 kHz e geralmente um modelo de ordem 2<sup>a</sup> ou 3<sup>a</sup> pode ser suficiente (MARTINEZ; MORK, 2005).

Os tópicos sobre a modelagem de transformadores são vastos, possuindo muitas formas de abordagens. Isso torna necessário que a aplicabilidade dos diferentes modelos existentes seja bem interpretada durante as simulações e testes.

### 2.6.2 Critérios Utilizados Para a Classificação dos Modelos

A modelagem de transformadores, conforme apresentado, pode ser abordada de diversas maneiras. O transformador é uma máquina de indução cujo princípio de funcionamento abrange os campos da física, da ciência dos materiais e da eletricidade. Características como magnetização e saturação do núcleo, indutância dos enrolamentos, rigidez dielétrica, composição química do material do núcleo, perdas elétricas e vibrações mecânicas, são considerados como parâmetros de muita importância tanto no projeto quanto na construção do transformador. Cada uma dessas características apresenta uma maior ou menor influência no comportamento do transformador perante os fenômenos transitórios aos quais está submetido.

Em anos recentes, tem havido a proposição, pela comunidade científica, de muitos modelos de transformadores de potência desenvolvidos para simulação de diferentes fenômenos transitórios. No entanto, eles não necessariamente consideram as mesmas características construtivas do equipamento.

Os modelos encontrados na bibliografia atual podem ser classificados em função de diversos critérios, dado o fato que cada modelo considera parâmetros distintos. Nesse sentido, os parâmetros que geralmente são considerados na modelagem desse equipamento podem ser definidos em função de:

- Características físicas, químicas, elétricas e mecânicas dos materiais utilizados na construção do transformador (por exemplo: histerese, saturação e correntes induzidas).
- Propriedades físico-elétricas associadas ao funcionamento da máquina (como ser: indutâncias próprias e mútuas entre os enrolamentos, indutâncias de dispersão e resistências dos enrolamentos).
- Configuração magnética e tipo de topologia do transformador (medidas e formas dos núcleos, número de fases envolvidas e dimensões do transformador).

Dessa forma, a dificuldade que se apresenta quando da escolha de um modelo de transformador que considere todas, ou quase todas as características apresentadas anteriormente, é grande. Assim, alguns modelos levam em consideração apenas os fatores relevantes ao estudo a ser desenvolvido.

Apresentam-se, a seguir, alguns dos critérios mais utilizados na escolha ou projeto de um modelo para transformadores de potência no intuito de resumir as principais abordagens.

#### 2.6.2.1 Critérios de Modelagem Baseados em Princípios Físicos

Segundo (DE LEON; SEMLYEN, 1994), os principais critérios utilizados para a modelagem e projeto de transformadores podem ser classificados como:

- i. *Modelagem Baseada nas Indutâncias Próprias e Mútuas*: há disponíveis fórmulas muito precisas para o cálculo das indutâncias próprias e mútuas dos enrolamentos, seções ou espiras do transformador. No entanto, devido à presença do núcleo de ferro, os valores numéricos das indutâncias próprias e mútuas são muito próximos e podem resultar em uma equação incondicional. O problema da incondicionalidade tem sido adequadamente resolvido em simulações de transitórios, desconsiderando o fluxo comum no cálculo das indutâncias próprias e mútuas. De fato, dita desconsideração reduz a quantidade de indutância própria e mútua no transformador o que é equivalente ao uso direto das indutâncias de dispersão da máquina.

- ii. *Modelagem Baseada na Indutância de Dispersão*: baseia-se na generalização do multi-enrolamento trifásico e alguns pesquisadores usaram a mesma técnica para a modelagem de transformadores do tipo multi-seção. Esses modelos representam adequadamente a indutância de dispersão do transformador (ou seja, em condições de carga ou de curto-circuito), mas o núcleo de ferro não está devidamente incluído.
- iii. *Modelagem Baseada no Princípio de Dualidade*: estas aproximações foram introduzidas por (CHERRY, 1949) onde o núcleo de ferro pode ser modelado com muita precisão. No entanto, modelos baseados apenas nessa abordagem têm o inconveniente de não representar corretamente as indutâncias de dispersão já que elas são diretamente derivadas do fluxo de dispersão, enquanto a espessura dos enrolamentos é ignorada. Essa imprecisão foi corrigida posteriormente por outros pesquisadores onde o campo magnético é assumido como radial. Esta aproximação é ainda utilizada na modelagem de transformadores em altas condições de saturação.
- iv. *Modelagem Baseada em Medições*: existe um grande número de modelos de transformadores para altas frequências derivados de medições (VAESSEN, 1988). Os testes para a determinação do modelo são realizados no domínio da frequência ou no domínio do tempo. Os modelos obtidos a partir de medições têm a desvantagem de que seu desempenho só pode ser garantido para os transformadores testados. Embora algumas tendências gerais possam ser inferidas a partir dos resultados dos testes (de acordo com a concepção, tamanho, fabricante, etc.), previsões exatas para os transformadores não testados não podem ser asseguradas, fazendo com que essa modelagem careça de generalização.
- v. *Análise com Base nos Campos Magnéticos*: projetistas de grandes transformadores utilizam a abordagem de campos eletromagnéticos para o cálculo dos parâmetros de projeto. A técnica de elementos finitos é a solução numérica mais aceita para problemas de campo e a análise de campo tridimensional é muitas vezes necessária no processo de projeto.

### 2.6.2.2 Outros Critérios para Classificação dos Modelos

Além das abordagens apresentadas anteriormente, existem outros critérios utilizados para a classificação dos modelos de transformadores (MARTINEZ; MORK, 2005) os quais apresentam-se a seguir:

1. Número de Fases: o transformador pode ser modelado considerando a quantidade de fases envolvidas na conversão de energia e a quantidade de enrolamentos contidos em cada fase.
2. Tipo de Representação: o transformador possui partes com características lineares (enrolamentos) e não-lineares (núcleo de ferro) que podem ser modeladas de forma separada. Cada parte possui uma determinada importância em determinadas faixas de frequência e em determinados fenômenos transitórios, marcando uma importante diferença na modelagem de cada uma delas.
3. Tipo de Parâmetros: é muito importante diferenciar os parâmetros constantes daqueles dependentes da frequência, já que cada um deles determina uma modelagem diferente.
4. Tipo de Abordagem Matemática: as diferentes teorias físico-elétricas utilizadas para a modelagem dos transformadores permitem ampliar a classificação dos modelos existentes. Assim, considerações como: admitâncias próprias e mútuas, densidade de fluxo magnético, divisão dos enrolamentos, considerações das capacitâncias, entre outros, são algumas das abordagens matemáticas utilizadas para modelar o transformador.

Além disto, (JANUARIO, 2007) propõe uma classificação dos modelos de transformadores considerando as características de comportamento dos elementos que conformam o transformador em determinadas faixas de frequência. Essa abordagem permite classificar os modelos de transformadores em função da faixa de frequências como sendo modelos para baixas, médias e altas frequências.

Com base na revisão feita neste trabalho, é possível perceber que a modelagem do transformador em função da faixa de frequências e a modelagem em função do tipo de representação apresentam-se como os critérios mais utilizados pelos pesquisadores na escolha do modelo de transformador a ser utilizado em seus trabalhos.

## **2.7 Metodologias Utilizadas no Aprimoramento da Proteção Diferencial**

A configuração dos SEP é projetada de modo a obter um sistema que fornece energia de qualidade e de forma confiável aos consumidores. Essas características de qualidade e confiabilidade têm muito a ver com a estratégia e os dispositivos de proteção utilizados pelas companhias elétricas. Um SEP é constituído por vários equipamentos elétricos, entre os quais o transformador, é um dos mais importantes tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Esse fato faz com que a aplicação de dispositivos de proteção para transformadores seja, além de necessário, muito importante para resguardar a estabilidade e qualidade da energia fornecida. Nesse contexto, a proteção diferencial surge como uma alternativa técnica e economicamente viável para a proteção de transformadores quando da ocorrência de faltas internas. No entanto, mesmo sendo um dos esquemas convencionais mais utilizados na proteção de transformadores, a filosofia de proteção diferencial apresenta ineficiências operacionais originadas, por exemplo, pelas correntes de *inrush* que fazem com que esse tipo de filosofia de proteção deva estar em constante evolução. O surgimento da tecnologia digital permitiu o desenvolvimento de relés mais rápidos, robustos e confiáveis, substituindo os relés eletromecânicos existentes. Assim sendo, neste trabalho detalham-se os aprimoramentos propostos em cada técnica digital de proteção diferencial e descrevem-se as principais características de cada metodologia.

### **2.7.1 Proteção Diferencial Digital de Transformadores**

A função principal dos relés diferenciais é distinguir entre uma falta interna, uma falta externa e correntes de *inrush* o qual consiste em uma tarefa um tanto difícil até os dias atuais. Objetivando mitigar os efeitos adversos da corrente de energização, inicialmente os relés diferenciais utilizaram uma temporização no tempo de atuação *–time delay* (MONSETH; ROBINSON, 1935; CORDRAY, 1931a) ou uma de-sensibilização temporária do relé (CORDRAY, 1931a; CORDRAY, 1931b) para mitigar o problema gerado pela corrente *inrush* transitória. Um sinal de tensão adicional para restringir (MONSETH; ROBINSON, 1935) ou bloquear (HARDER; MARTER, 1948) o relé diferencial também foram propostas. Estas propostas aumentaram a velocidade de operação a custas de uma maior complexidade do sistema de proteção diferencial. Outras abordagens utilizam informação de tensão para fornecer proteção aos transformadores (SYKES, 1972; THORP; PHADKE, 1982; INAGAKI et al., 1998). No entanto, fornecer o sinal de tensão ao relé diferencial requer Transformadores de Tensão (TP) os quais normalmente não são considerados na filosofia de proteção diferencial.

É muito importante compreender que a corrente transitória de *inrush*, que aparece quando da energização dos transformadores, não é uma condição de falta interna e, portanto, o relé de proteção diferencial não deve atuar (LI; CHAN, 1998). Segundo (MAO; AGGARWAL, 2000), a correta discriminação entre a corrente de *inrush* transitória e uma situação real de falta interna ao transformador apresentam-se como um dos problemas mais desafiadores para

os engenheiros quando da proteção de TDP. Diante disso, existem muitas metodologias para diferenciar essas situações, sendo as principais: a restrição de harmônicas, baseado no comportamento das componentes harmônicas das correntes diferenciais; o princípio do fluxo disperso, baseado na característica magnética do núcleo e; o princípio do circuito equivalente, baseado na mudança da indutância magnética (LI; CHAN, 1998).

Nesse sentido, (RAHMAN; JEYASURYA, 1988) apresentam uma revisão dos algoritmos de proteção digital de transformadores comparando-se, a base matemática, as velocidades de resposta, o esforço computacional e a eficiência quanto à discriminação entre corrente de *inrush* e faltas internas ao transformador. Os algoritmos analisados baseiam-se em diferentes métodos de análise, a saber: aproximação de Fourier, transformada retangular, funções Walsh, funções Haar, resposta ao impulso finito e aproximações por mínimos quadrados. O estudo mostrou que os algoritmos comparados apresentam pouca diferença quanto à eficiência e tempo de processamento, mais a utilização de ferramentas, tais como: Fourier, transformada retangular, resposta ao impulso finito e aproximação dos mínimos quadrados, oferecem melhor aplicabilidade num relé diferencial com microprocessador.

Em (LING; BASAK, 1988) apresenta-se um sistema para medição e análise do conteúdo de harmônicos presentes na corrente de *inrush* de um transformador monofásico. A amostragem dos dados da corrente diferencial é feita com microcomputadores e a análise do comportamento harmônico dos primeiros ciclos da corrente transitória efetua-se através de um *software* baseado na técnica da Série de Fourier. O estudo mostra os efeitos da densidade de fluxo remanescente, do ângulo de energização e da resistência do enrolamento primário sob o comportamento da corrente de *inrush*. A metodologia proposta apresenta a vantagem de medir eficientemente a magnitude, duração e conteúdo de harmônicas de cada ciclo da corrente de *inrush*. Por outro lado, em (LING; BASAK, 1989) analisa-se o comportamento do conteúdo de 2ª harmônicas da corrente de *inrush* em transformadores monofásicos e trifásicos quando da variação do instante de energização, geometria e resistência do enrolamento primário e densidade de fluxo remanescente. A análise do padrão da componente de 2ª harmônica, perante a combinação dos parâmetros acima expostos, é feita utilizando um método computacional baseado na integração em tempo real da corrente diferencial de energização. No mesmo ano, (SACHDEV; SIDHU; WOOD, 1989) propuseram um algoritmo de proteção digital para detecção de faltas nos enrolamentos dos transformadores monofásicos e trifásicos. O algoritmo proposto não requer o conhecimento prévio da característica de magnetização do núcleo do transformador, além de não utilizar a corrente harmônica de 2ª ordem para o processo de restrição do relé durante as condições de energização.

No trabalho desenvolvido em (MURTY; SMOLINSKI, 1990) estuda-se o projeto e construção em tempo real de um relé diferencial percentual digital baseado em um filtro de Kalman. Um filtro de Kalman de 11 estados é utilizado para estimar a componente fundamental e a componente de 5ª harmônica dos sinais de corrente do transformador. O relé baseia-se na restrição da 2ª harmônica para diferenciar as condições de corrente de *inrush* e da 5ª harmônica para a detecção das condições de sobre-excitação. O tempo de operação do relé proposto é de meio ciclo para condições de faltas internas e é constituído por um processador digital de sinais tipo TMS320. (SIDHU; SACHDEV, 1992) apresentam um sistema baseado em microprocessadores para identificação em tempo real da corrente de *inrush* e condições de faltas internas. O sistema proposto utiliza um algoritmo digital que pode ser utilizado, independentemente do fato de poder ou não medir a corrente dos enrolamentos do transformador. Dito sistema é adequado para monitorar o estado operacional do transformador e controlar a operação do relé diferencial. A construção do algoritmo sobre um microprocessador utiliza os dados de seis sinais de corrente e seis de tensão amostrados e processados em tempo real para discriminar as correntes de *inrush* das faltas internas. O algoritmo de detecção de faltas internas foi construído através de *software* e um *hardware* e

testado em ambiente de laboratório. Dentro da mesma temática, destacam-se ainda os trabalhos apresentados em (LIN et al., 1993), (KEZUNOVIK; FROMER; PHILLIPS, 1994), (PEREZ et al., 1994), (KOLLA, 1995), (WISZNIEWSKI; KASZTENNY, 1995), (STRINGER et al., 1997), (MAO et al., 1998), (KASZTENNY; KESZUNOVIC, 1998), (GUZMAN et al., 2001), (GUZMAN, 2002).

Entre outros trabalhos, destaca-se o apresentado por (HE; JOU, 2006) no qual propõe-se um esquema para identificação de corrente de *inrush* baseado na estimação de erros entre dois sinais. Nesse algoritmo, utiliza-se a forma de onda das correntes de *inrush* para discriminar o tipo de distúrbio acontecido. A discriminação é feita através de uma comparação de similaridade entre a forma de onda do sinal estudado (corrente diferencial) e duas ondas de referência para duas frequências distintas. Os resultados apresentados mostram que o tempo de operação dessa metodologia fica entre 10 e 13 milissegundos. As propostas de (TRIPATHY; MAHESHWARI; VERMA, 2006) e (TRIPATHY; MAHESHWARI; VERMA, 2008) apresentam um esquema de proteção diferencial baseado em Redes Neurais Probabilísticas (RNP). A técnica, conhecida como *Particle Swarm Optimization*, é utilizada nesses trabalhos para selecionar o valor ótimo dos parâmetros das RNP. Finalmente, (VASQUEZ et al., 2008) e (CASTILLO; MARTINEZ, 2010) propõem esquemas de proteção diferencial de transformadores baseados na Análise de Componentes Principais. Essa metodologia de proteção utiliza um padrão de reconhecimento a partir de dados de correntes diferenciais como fator de identificação das correntes de *inrush*.

### 2.7.2 Proteção Diferencial de Transformadores Utilizando a Transformada Wavelet (TW)

Diversas metodologias foram propostas para a proteção diferencial de transformadores de potência utilizando-se a TW. Diante disso, destaca-se inicialmente o trabalho de (LI; CHAN, 1998) onde se apresenta uma pesquisa sob a identificação de corrente de *inrush* em transformadores utilizando Transformada Wavelet Diádica (TWDI). Ditas correntes são simuladas utilizando o *software* EMTP (*Electromagnetic Transient Program*) com diferentes valores de fluxo remanescente e vários instantes de energização. A TWDI é utilizada para a análise de assinatura das ondas *inrush* simuladas apresentado-se somente resultados preliminares onde a wavelet mãe tipo Daubechies é escolhida para o estudo. Nesse mesmo sentido, outro trabalho similar utilizando TWDI foi apresentado anos mais tarde por (YANG, 2001).

Segundo o teorema de Parseval, a energia de um sinal pode ser obtida pela somatória dos coeficientes da Série de Fourier e, assim, uma teoria similar pode ser aplicada para a TW. Sendo assim, o plano tempo-frequência pode ser dividido em vários retângulos que representam a distribuição percentual de energia do sinal estudado. Isso leva à caracterização de qualquer sinal através de um vetor composto por medidas de sua energia em cada faixa de tempo-frequência. Neste sentido, em (GOMEZ-MORANTE; NICOLETTI, 1999) propõe-se um estudo baseado na análise wavelet para discriminar correntes *inrush* de correntes provocadas por faltas internas ao transformador. A técnica de discriminação baseia-se em uma análise estatística onde é avaliada a probabilidade de que um vetor pertença a um determinado grupo de retângulos dentro do plano tempo-frequência. Esses grupos definem-se como: Grupo A (correntes de arco interno) e Grupo I (correntes *inrush*). Da mesma forma, em (MAO; AGGARWAL, 2000) propuseram um método de decisão lógica para discriminar correntes de *inrush* em transformadores de potência utilizando a TW. Já em (BO; WELLER; LOMAS, 2000) apresenta-se uma técnica que se preocupa com a detecção de faltas que geram correntes transitórias de alta frequência. Um relé especialmente projetado é sintonizado para as faixas de alta frequência para capturar os sinais de corrente transitória em ambos os lados

do transformador, as quais são convertidas em dois sinais modais através de um circuito modal misto. A energia espectral desses sinais é extraída para produzir os sinais de operação ou restrição do relé; uma comparação entre os níveis dos dois sinais determina quando a falta é interna ou externa à zona protegida. A técnica detecta também as correntes *inrush* utilizando as componentes de alta frequência contidas no sinal de corrente transitória. A correta seleção da frequência central do filtro de transitórios do relé proposto é fundamental para o desenvolvimento satisfatório desse esquema.

(YOUSSEF, 2003) propôs uma técnica baseada na Transformada Wavelet Discreta (TWD) para diferenciar entre correntes de falta interna e correntes de energização em transformadores. A principal vantagem desta metodologia é que o tempo de operação é inferior à metade de um ciclo (baseado em uma frequência de amostragem de 5 kHz). Um transformador de 132/11 kV conectado a um sistema de 132 kV é simulado utilizando o *software* EMTP e os dados gerados são utilizados em ambiente MATLAB® para testar a metodologia proposta. (BUTLER-PURRY; BAGRIYANIK, 2003) também apresenta uma metodologia para caracterizar transitórios que resultam de faltas internas em transformadores utilizando a TWD. Os parâmetros do circuito equivalente que representam o transformador são calculados utilizando o *software* Maxwell ANSOFT's. O sub-circuito resultante do modelo é exportado e utilizado no programa de análise de circuito, Maxwell SPICE, para estudar o comportamento do transformador. Nessa metodologia, quando uma falta interna acontece no enrolamento primário ou secundário, o enrolamento faltoso é dividido em duas seções para faltas do tipo espira-terra, ou dividido em três seções quando as faltas são do tipo espira-espira. Essa nova configuração do enrolamento exige o cálculo da indutância mútua de dispersão entre as novas seções. Outros algoritmos de proteção diferencial de transformadores de potência que utilizam a TWD como ferramenta de análise são propostos nos trabalhos de (KUNAKORN, 2004), (KUNAKORN; NGAOPITAKKUL; NGAMROO, 2005), (SEDIGHI; HAGHIFAM, 2005), (ÖZGÖNENEL; ÖNBILGIN; KOCAMAN, 2005).

Em (SALEH; RAHMAN, 2004) introduziu-se uma construção e teste em tempo real de um algoritmo de proteção baseado na Transformada Wavelet Packet (TWP) para proteção de TDP trifásicos. O algoritmo proposto é construído utilizando um Processador Digital de Sinais (PDS) do tipo DS1102 colocado e testado em dois diferentes transformadores trifásicos. Os resultados dos testes mostraram uma total independência dessa metodologia com os parâmetros do transformador e com a saturação dos TCs. Os autores afirmam que as características imprevisíveis das correntes de *inrush* não afetam a capacidade do algoritmo para diagnosticar esse evento como um distúrbio de corrente não faltosa. Os mesmos autores apresentaram alguns anos depois uma extensão na proteção diferencial de transformadores baseado na TWP anteriormente proposta (SALEH; RAHMAN, 2005). Também (EISSA, 2005) apresentou uma técnica digital direcional para proteção de transformadores baseada na TWP.

(KUMAR, 2005) apresenta uma aplicação da Transformada Wavelet Contínua (TWC) para a detecção de faltas nos enrolamentos de AT dos TDP mediante a análise dos impulsos de tensão e corrente de neutro. Nesse trabalho, a corrente de neutro para uma falta localizada no enrolamento do transformador foi analisada usando a ferramenta MATLAB® Wavelet Toolbox. (ÖZGÖNENEL, 2006) apresenta um esquema de proteção de transformadores utilizando a TWC para a análise de descontinuidade no sinal de corrente primária durante uma falta interna. Um protótipo de transformador construído para mudanças de *tap* é utilizado para os estudos de laboratório. Nesse trabalho a TWC é proposta para distinguir entre correntes de *inrush*, condições normais de operação, mudanças na carga e faltas internas. A wavelet mãe tipo "Mexican Hat" foi utilizada para a extração das características de discriminação utilizadas pelo algoritmo. Já em (VALSAN; SWARUP, 2008) estudou-se o projeto e construção de um relé diferencial digital lógico que identifica e discrimina o tipo de falta,

considerando sinais direcionais de potência. O relé lógico consiste de duas partes: detecção do distúrbio, baseada somente no primeiro nível de detalhes de alta frequência dos sinais de tensão, e discriminação da falta, que utiliza o sinal direcional da potência derivada do primeiro nível de detalhe de alta frequência de ambos os sinais de tensão e corrente. O tempo de operação desse relé foi de 6 milissegundos e a velocidade da lógica proposta foi exaustivamente testada por simulação de vários tipos de faltas internas, externas e condições de energização em um sistema de 132 kV modelado no ATP/EMTP com um transformador de 31,2 MVA, 132/33kV, conexão Y- $\Delta$ . Filtros anti-*aliasing* e de Butterworth são utilizados para detectar componentes de frequências específicas. O relé proposto foi comparado com o relé convencional, baseado na restrição de 2ª harmônica por Fourier, mostrando melhores resultados. Por outro lado, (OU et al., 2007) apresenta um esquema de proteção utilizando a Transformada Wavelet De-Noising. Também em (FAIZ; LOTFI-FARD, 2006) propuseram um algoritmo baseado no processamento das correntes diferenciais para a proteção digital de TDP, considerando o comportamento desigual que essas correntes apresentam quando da faltas internas e correntes de *inrush*. Nessa metodologia, o critério de decisão é definido em termos da diferença de amplitude dos coeficientes wavelet sob uma faixa específica de frequências.

Em (MEGAHED; RAMADAN; ELMAHDY, 2008) propuseram uma metodologia de proteção diferencial para TDP baseada na energia de determinados detalhes da TW. Este trabalho apresenta um esquema de proteção que aumenta a confiabilidade do relé de proteção diferencial convencional. A energia espectral dessas componentes de baixa frequência é calculada e também a mudança da energia espectral. Essas são utilizadas para o critério de discriminação entre correntes de *inrush* e faltas internas no algoritmo de proteção.

Um fato importante a ser observado é que os trabalhos que abordam a aplicação de técnicas inteligentes e a TW para solução desses problemas, baseiam-se na capacidade que estas ferramentas possuem em mapear os relacionamentos existentes entre as entradas e saídas de processos não-lineares e em indicar a existência de eventuais descontinuidades nos sinais de entrada. Desta forma, a aplicação destas ferramentas na proteção e no monitoramento de TDP é atrativa, já que as condições operativas dos transformadores possuem características particulares e os transitórios decorrentes das situações de defeitos são facilmente identificados.

Ressaltam-se, atualmente, as técnicas relacionadas à TWD que, juntamente com a Técnica de Análise Multirresolução (AMR), permite analisar as formas de onda dos eventos, detectar, localizar no tempo e classificar diversos distúrbios.

### **2.7.3 Proteção Diferencial de Transformadores com Combinação de Técnicas de Análise**

Observa-se que o uso de ferramentas inteligentes, como Rede Neural Artificial (RNA) e Lógica *Fuzzy* (LF), associadas à TW vem sendo estudadas e utilizadas como alternativa para contornar os problemas apresentados na filosofia de proteção diferencial de TDP. Para (KAIIVATHI; REDDY; SINGH, 2005) tais métodos promovem uma melhoria significativa na seletividade, na sensibilidade e na operação dos relés diferenciais, evidenciando possíveis soluções para alguns dos problemas citados anteriormente.

Em (MAO; AGGARWAL, 2001) se apresenta uma nova abordagem para classificar os fenômenos transitórios em TDP utilizando uma combinação de TW e RNA. A TW é utilizada primeiramente para decompor o sinal de corrente diferencial do transformador em uma série de detalhes de componentes wavelet. A energia espectral dessas componentes é obtida e logo utilizada para treinar as RNA. Essa última é utilizada para discriminar uma falta interna de um fenômeno *inrush*. A wavelet mãe Daubechies 4 é utilizada neste trabalho. No mesmo sentido

(GEETHANJALI; SLOCHANAL; BHAVANI, 2005) também apresenta um algoritmo de proteção para transformadores trifásicos baseado na combinação das TW junto a RNA. Diversas condições de operação foram simuladas neste trabalho, no qual a TW é utilizada na análise de transitórios em transformadores por sua habilidade para extrair informação dos sinais transitórios nos domínios do tempo e da frequência. As RNA são utilizadas aqui por causa de sua capacidade de auto-aprendizagem e sua capacidade de mapeamento não-linear. Uma abordagem similar foi apresentado em (MORTAZAVI; KHORASHADI-ZADEH, 2004).

(NGAOPITAKKUL; KUNAKORN, 2006) propuseram uma combinação da TWD e RNA para detectar e classificar faltas internas em transformadores trifásicos de dois enrolamentos. As condições de falta para obter os sinais de corrente diferencial foram simuladas utilizando o *software* ATP/EMTP. O processo de treinamento das RNA e a decisão de diagnóstico da falta são construídos utilizando o *toolbox* Simulink de MATLAB®. A TWD é utilizada para extrair o valor máximo do primeiro detalhe em 1/4 de ciclo das fases A, B, e C dos sinais de corrente diferencial pós-falta. O valor máximo do primeiro detalhe junto à corrente de sequência zero é utilizado como entrada no processo de treinamento das redes neurais.

(MONSEF; LOTFIFARD, 2007) propuseram um método de proteção diferencial para TDP que utiliza a combinação de TW com um Sistema de Interface *Fuzzy* baseado em Circuitos Adaptativos (ANFIS) para discriminar correntes inrush de faltas internas. A discriminação tem como base a diferença entre as amplitudes dos coeficientes da TW em uma faixa de frequências específicas. A metodologia proposta utiliza a informação extraída da TW como sinais de entrada para as ANFIS e as suas saídas fornecem o sinal de atuação (saída no valor 1) ou restrição do relé (saída no valor 0). Nesse algoritmo, um conjunto de dados primários é necessário para que o sistema de interface *fuzzy* possa utilizá-los como padrões de treinamento. Quando o número de parâmetros adaptativos aumenta o sistema requer mais amostras para seu treinamento aumentando consideravelmente o tempo de resposta do algoritmo. A metodologia é testada através de simulações feitas com o *software* PSCAD/EMTDC.

Em (ABED; MOHAMMED, 2007) fizeram uma pesquisa sobre o comportamento de um transformador trifásico com falta interna em condições de funcionamento senoidais e não-senoidais. O comportamento do transformador é estudado por acoplamento do modelo físico de transformadores com base em elementos finitos e equações de circuito elétrico externo. A TWD foi utilizada para extrair as características da corrente de falta do transformador.

## 2.8 Sumário

Neste capítulo foram inicialmente apresentados os principais métodos de proteção de TDP destacando-se também as consequências de faltas neste equipamento. Além disso, foram abordados os principais aspectos que fazem a proteção diferencial percentual ser a principal metodologia de proteção para transformadores de potência. Embora a proteção diferencial possua elementos que se destacam na sua aplicação em transformadores, esta possui uma série de limitações, as quais podem comprometer o funcionamento do sistema elétrico como um todo. Um panorama geral das limitações da proteção diferencial foi abordado neste capítulo.

As manobras de energização de transformadores de potência podem gerar sobretensões e sobrecorrentes transitórias elevadas no sistema. A amplitude e o amortecimento dessas grandezas dependem das características não lineares do núcleo, do tipo de ligação dos enrolamentos dos transformadores, da configuração e das características do sistema de transmissão e, também, dos instantes de fechamento dos polos do disjuntor em relação à onda de tensão. A presença de outros componentes não lineares nos barramentos do transformador manobrado pode gerar ferro-ressonâncias que desencadeiam elevadas sobretensões

sustentadas nestes barramentos. Estes fenômenos podem ser suficientes para comprometer a suportabilidade do equipamento energizado, como também, a dos equipamentos em operação nesta e nas subestações vizinhas e ainda levar à atuação das proteções associadas aos mesmos, comprometendo o desempenho do sistema. Nesse sentido, foi apresentado um panorama geral sobre algumas das principais abordagens propostas para o monitoramento e a proteção de transformadores de potência, considerando as diversas técnicas existentes.

Apresentaram-se também diferentes técnicas de análise utilizadas nos últimos anos para melhorar o projeto e a operação dos relés de proteção diferencial e os resultados obtidos dessas mostraram uma melhoria quanto à correta operação dos relés. Os trabalhos apresentados dividiram-se em três grandes grupos, a saber: esquemas de proteção baseados em ferramentas inteligentes (lógica *fuzzy*, redes neurais artificiais, entre outras), esquemas de proteção baseados na utilização da TW e, por fim, esquemas de proteção baseados na combinação operacional de diferentes técnicas e/ou ferramentas de análise. Em anos recentes, a técnica Wavelet surgiu como uma poderosa ferramenta de diagnóstico para a análise de fenômenos transitórios e a sua aplicação nos campos da proteção digital de sistema de potência tem despertado o interesse de muitos pesquisadores.

### **3. METODOLOGIA DE PROTEÇÃO PROPOSTA**

Neste capítulo serão abordados diferentes tópicos vinculados com a metodologia de proteção de Transformadores de Potência (TDP) proposta neste trabalho. Inicialmente serão apresentados os aspectos mais relevantes que visam justificar a utilização da Transformada Wavelet Discreta (TWD) e da Análise Multi-Resolução (AMR) na caracterização dos eventos estudados nesta pesquisa. Assim, uma comparação teórica sucinta entre a Transformada de Fourier (TF) e a Transformada Wavelet (TW) é apresentada. Posteriormente, uma introdução sobre a energia e potência dos componentes de detalhe da TW é realizada. A metodologia de proteção proposta é apresentada em seguida, através da definição dos critérios utilizados para a discriminação dos eventos estudados.

#### **3.1 Introdução à Análise de Sinais**

A principal função de um sistema de proteção de TDP é atuar de forma rápida e segura perante um distúrbio objetivando eliminar de forma seletiva o elemento causador de defeito. Com o advento dos computadores digitais, a proteção digital lentamente começou a substituir as técnicas tradicionais de proteção de sistemas elétricos de potência (SEP). Esta substituição iniciou-se na década de 60, e hoje se pode afirmar que é a técnica dominante aplicada na prática (COSTA de VERNEY, 2012).

A proteção digital encontra-se instalada em diversos locais do sistema elétrico e, além das funções de proteção, permitem processar grandes quantidades de dados formando um sistema integrado de processamento de informação. Geralmente, estes sistemas integrados permitem programar diversas funções tais como: proteção, controle, supervisão e monitoramento do sistema onde esta instalada.

O sucesso da aplicação destas funções nos relés digitais depende fortemente do tipo de ferramenta utilizada no processamento dos sinais que serão utilizadas na metodologia de proteção desenvolvida. Toda informação contida nos sinais elétricos será mais bem aproveitada (ou melhor processada) se a ferramenta utilizada é a correta. Atualmente diversas técnicas são aplicadas para tratamento de sinais como, por exemplo, a Transformada de Fourier (TF) que tem como característica, fornecer a decomposição do sinal no domínio da frequência. Por outro lado, a Transformada de Fourier Janelada (TFJ) pode decompor o sinal no domínio tempo-frequência, porém, utilizando uma janela de análise de tamanho fixo (HARRIS, 1978). Neste sentido, a TF e a TFJ tornaram-se muito utilizadas na área de SEP para processamentos dos sinais elétricos, no entanto, determinadas informações contidas nos sinais não são bem identificadas originando desenvolvimento de novas técnicas para processamento de sinais, como por exemplo, a Transformada Wavelet (TW). A TW é uma interessante ferramenta para a análise de sinais e representa o próximo passo lógico em relação à análise de Fourier, sendo uma técnica de janela deslizante com regiões de tamanhos variáveis. Esta técnica permite o uso de longos intervalos de tempo (janelas mais dilatadas)

quando se requer maior precisão nas informações contidas nas baixas frequências, e pequenos intervalos de tempo (janelas mais compactas) quando se necessita identificar distúrbios nas regiões das altas frequências (ADDISON, 2002).

O campo de aplicação da TW é vasto e na área específica dos SEP tem abrangido um grande número de tópicos. Sua aplicação na área de proteção de sistemas elétricos e qualidade de energia têm sido amplamente pesquisadas (AKOREDE; HIZAM, 2009). Por outro lado, a aplicação da TW na proteção de máquinas elétricas, especialmente na proteção de transformadores, tem conseguido resolver muitos dos problemas encontrados na metodologia de proteção diferencial tradicional baseada na utilização da TF (OLIVEIRA et al., 2012a). A grande vantagem da TW é permitir transformar um sinal para o plano tempo-frequência variando o tamanho da janela de análise segundo a frequência do sinal. Esta característica permite que esta ferramenta também seja muito utilizada na área de eventos transitórios (DAUBECHIES, 1990).

A TF é uma das ferramentas matemáticas mais utilizadas para a análise de sinais unidirecionais e processamento de imagens. Neste trabalho, a TF não é utilizada diretamente no algoritmo de proteção proposto mais se entende que a sua abordagem neste capítulo é importante para identificar como a TW pode substituí-la em determinadas situações. Em particular, a comparação da TW com a TF ilustra as vantagens de se utilizar a primeira sobre a segunda, na análise dos sinais transitórios decorrentes dos distúrbios que acontecem nos SEP e especificamente nos TDP.

### **3.2 Comparação da Transformada Wavelet com a Transformada de Fourier**

As formas de onda associadas com transitórios eletromagnéticos rápidos são tipicamente sinais não-periódicas as quais contêm oscilações de alta frequência e impulsos sobrepostos sobre a frequência da rede e suas harmônicas. Estas características apresentam um problema para a análise de Fourier porque a mesma assume que o sinal analisado é periódico e porque o sinal de banda larga (*wideband*) exige maior frequência de amostragem e períodos mais longos de tempo para manter uma boa resolução nas frequências baixas. Assim, é desejável utilizar um método de análise baseado na frequência como tentativa de isolar os componentes transitórios do sinal, o qual pode ajudar na identificação dos fenômenos particulares que geraram o transitório (ROBERTSON, et al., 1996).

Fenômenos físicos poder ser tanto de natureza estacionária<sup>3</sup> quanto não-estacionária levando à possível utilização de distintas ferramentas para estudar tais fenômenos, dentre elas a TF e a TW. A TF é mais eficaz no estudo de fenômenos de natureza estacionária e a TW é utilizada tanto para fenômenos de natureza estacionária quanto não-estacionária. De forma geral, existem muitas semelhanças entre a análise de Fourier e a análise Wavelet dado o fato de que em ambos os casos sinais são analisados por expansões em termos de funções básicas. Dentro da filosofia da análise Wavelet, as bases são localizadas tanto no domínio das frequências quanto no domínio temporal. Devido a esta propriedade de dupla localização, há um equilíbrio nas resoluções em cada um dos domínios, ou seja, o ganho de resolução temporal é compensado com uma perda de resolução em frequência (CASTILHO; PEREIRA Jr., 2005).

Como foi dito, a TW é uma ferramenta eficiente para a análise de sinais não-estacionárias e de rápida transição dado que mapeia o sinal em uma representação tempo-frequência, da mesma forma que a Transformada de Fourier Janelada (TFJ). A diferença com a TFJ é que a TW pode realizar uma Análise Multi-Resolução (AMR) onde a análise de frequências altas

---

<sup>3</sup> Sinal estacionário: são aqueles sinais cujo conteúdo de frequências não muda no tempo. Todas as componentes de frequência estão presentes em todo instante de tempo.

realiza-se utilizando janelas estreitas e a análise das frequências baixas e feito utilizando janelas mais cumpridas, apresentado assim a propriedade de adaptação das janelas base segundo a faixa de frequências que se pretende avaliar.

Esta seção aborda uma breve comparação entre a análise de Fourier e a análise Wavelet visando justificar a escolha da TW em contrapartida a técnicas clássicas de análise espectral.

### 3.2.1 Introdução à Transformada de Fourier

A TF é uma ferramenta matemática tradicional<sup>4</sup> que fornece o espectro de frequências de um sinal contínuo no tempo. A Transformada de Fourier  $X(f)$  de um sinal contínuo no tempo  $x(t)$  é representado como sendo:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.1)$$

A função contínua  $X(f)$  é a representação no domínio da frequência do sinal  $x(t)$  no domínio do tempo obtida pela somatória de um infinito número de exponenciais complexas.

Para encontrar  $X(f)$  de um sinal discreto (amostras) e de comprimento finito (limitado no tempo) é utilizado a Transformada de Fourier Discreta (TFD). Esta transformada é definida como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (3.2)$$

$$x[n] = x(nT_s) \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.3)$$

onde:

$x[n]$  sequência obtida por amostragem do sinal contínuo  $x(t)$ ;

$T_s$  tempo de amostragem;

$N$  número de amostras.

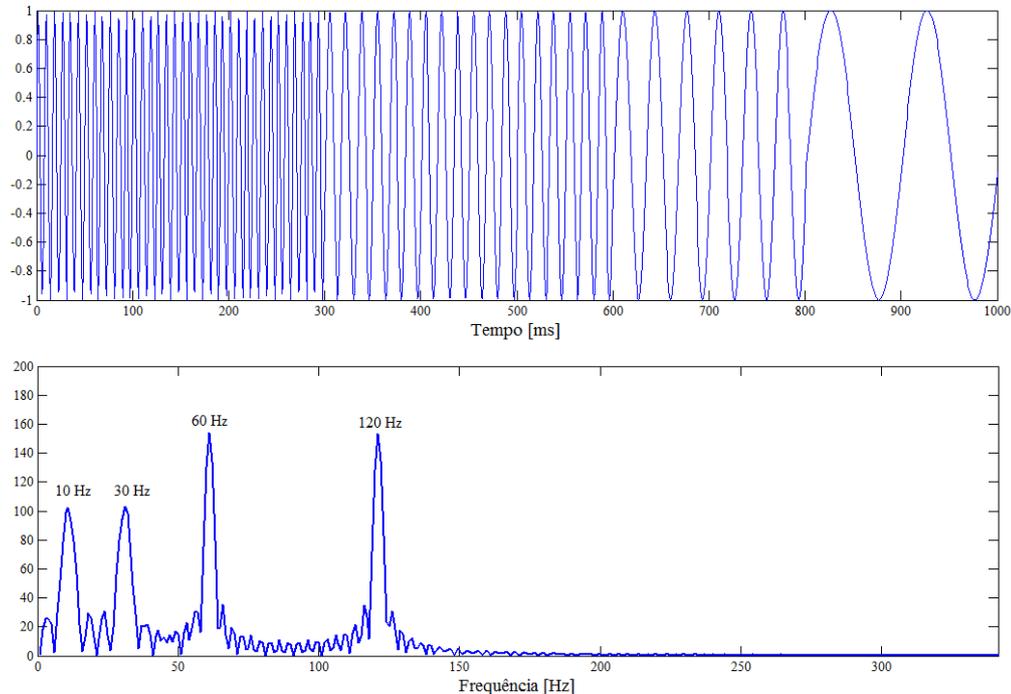
A TFD gera uma sequência de valores complexos  $X[k]$  cujas magnitudes são as frequências discretas em  $x[n]$ . A derivação da TFD estritamente requer que  $x[n]$  seja periódica, assim a representação de um sinal através da TFD é reservada para sinais periódicos. Este e o critério de amostragem de Nyquist<sup>5</sup> são duas ressalvas importantes para o uso da TFD (ROBERTSON et al., 1996).

A TFD tem um papel fundamental na construção de diversos algoritmos de processamento digitais de sinais. Por sua capacidade para representar sequências periódicas através de suas componentes espectrais, é possível efetuar diversas operações com computadores digitais, tais como análise espectral, filtragem linear e convoluções. No entanto, a TFD fornece informação em frequência do sinal, mais não indica o instante de tempo no qual as componentes de frequência acontecem. Esta informação não é tão importante para sinais estacionários (dado que as componentes de frequência do sinal estão presentes em todos os instantes de tempo), mais se torna vital quando se analisa sinais não-estacionários. Esta limitação da TFD pode ser ilustrada através da Figura 7 onde se apresenta um sinal não estacionário com 4 componentes de frequência para 4 intervalos de tempo diferentes. Neste sinal o intervalo 0 a 300 ms contém um sinal senoidal de 100 Hz, o intervalo de 300 a 600 ms uma senoidal de 50 Hz, o intervalo

<sup>4</sup> Tradicional no sentido de ser uma ferramenta comumente utilizada na análise espectral de sinais.

<sup>5</sup> O critério de Nyquist diz que a frequência de amostragem de um sinal deve ser pelo menos duas vezes maior do que a maior frequência do sinal.

de 600 a 800 ms uma senoidal com uma frequência de 25 Hz e finalmente o intervalo de 800 a 1000 ms uma senoidal com frequência de 10 Hz. Ao utilizar a TFD observa-se que aparecem quatro picos correspondentes às frequências presentes no sinal (10, 30, 60 e 120 Hz) tal como apresentado na Figura 7.



**Figura 7** Sinal não estacionária e espectro de frequências obtidas através da TFD.

Observa-se na figura acima que a TFD detecta as 4 componentes de frequência do sinal mais não fornece informação do tempo no qual estas componentes acontecem. Isto se deve ao fato de a TFD somente estimar variáveis do conteúdo espectral de um sinal e não sobre a localização temporal das componentes. Esta é a razão pela qual a TFD não é uma técnica ótima para análise de sinais não-estacionários quando deseja-se obter uma correspondência da informação no plano tempo-frequência. Além de não revelar informação temporal das componentes as magnitudes também não são determinadas com precisão.

Neste sentido, transformadas mais sofisticadas baseadas na análise de Fourier têm sido desenvolvidas para facilitar a análise de sinais não-periódicas. Assim foi proposta a Transformada de Fourier Janelada (TFJ)<sup>6</sup>, a qual assume uma periodicidade local do sinal onde uma janela de largura fixa é deslocada continuamente no tempo.

### 3.2.2 Transformada de Fourier Janelada (TFJ)

Objetivando estender a utilização da TF à análise de sinais não-estacionários, e por conseguinte, realizar um balanço à exatidão nos domínios tempo e frequência, Dennis Gabor propôs a Transformada de Fourier Janelada (TFJ). A TFJ foi proposta com o objetivo de resolver o problema de análise de sinais não-estacionários da TFD. A TFJ é similar à TF, no entanto, o sinal de entrada  $x(t)$  é multiplicado por uma função janela  $w(t-\tau)$  que é deslocada num tempo  $\tau$  (ROBERTSON et al., 1996):

$$TFJ(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.4)$$

<sup>6</sup> Conhecida também como Transformada de Fourier de Tempo Curto pelo seu nome em inglês STFT –*Short Time Fourier Transform*.

A TFJ consiste em dividir o sinal não-estacionário em diferentes partes onde se pode considerar que o sinal é estacionário. Para implementar digitalmente a TFJ é utilizada a Transformada Discreta de Fourier Janelada definida como (ROBERTSON et al., 1996):

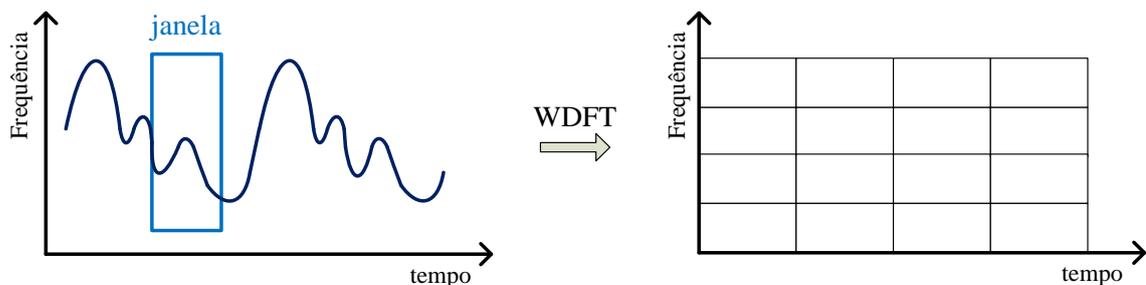
$$WDFT[k, m] = \sum_n x[n] w[n-m] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (3.5)$$

onde a sequência  $w[n-m]$ , na sua forma simples, é a função janela retangular definida como (ROBERTSON et al., 1996):

$$w[n] = \begin{cases} 1 & \text{se } 0 \leq n-m \leq N-1 \\ 0 & \text{em outro caso} \end{cases} \quad (3.6)$$

Para cada janela  $w_{m_0} = w[n-m_0]$ , a WDFT gera uma sequência de valores complexos  $WDFT[k, m_0]$ ,  $k=0, 1, \dots, N-1$ , cujas magnitudes são a frequência discreta da entrada  $x[n]$ .

A WDFT de um sinal pode ser representada por uma rede em duas dimensões, como mostrado na Figura 8, onde as divisões na direção horizontal representam o tempo de medida de cada janela  $w[n-m]$  e as divisões na direção vertical representam a frequência  $k$  associada.

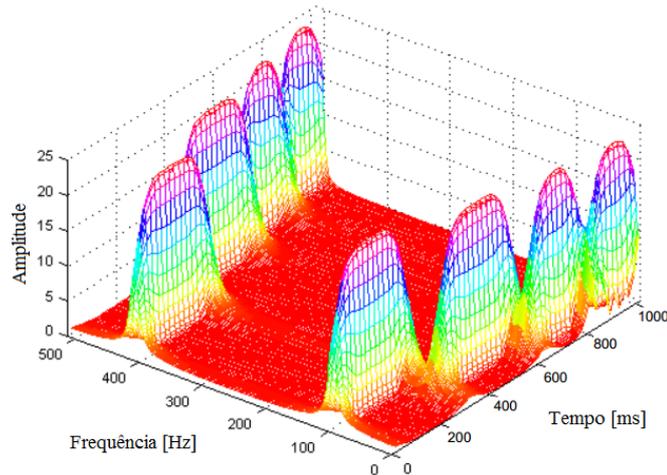


**Figura 8** Resolução tempo-frequência da WDFT.

Objetivando entender melhor como trabalha esta transformada, se utiliza o sinal não-estacionário da Figura 7 sob o qual se aplica a WDFT. O resultado desta transformação é apresentado na Figura 9. Como observado, a WDFT deste sinal pode ser representado em três dimensões (tempo, frequência e amplitude) e salienta-se que o gráfico é simétrico em relação ao ponto médio do eixo de frequências dado que a WDFT é a versão janela da TF que é sempre simétrica.

Na Figura 9 observam-se quatro picos que correspondem às quatro componentes de frequência do sinal original localizados em diferentes intervalos de tempo. Com isso, tem-se uma representação tempo-frequência do sinal dado que se conhecem as componentes de frequência do sinal é a sua localização no tempo. Inicialmente conclui-se que o problema da representação tempo-frequência de um sinal esta resolvido, no entanto, existe associado um problema relacionado ao Princípio de Incertezas de Heisenberg<sup>7</sup> originalmente aplicado ao movimento e localização de partículas móveis. Com base neste principio podemos dizer que não é possível conhecer a representação exata tempo-frequência de um sinal, e sim os intervalos de tempo nos quais existem determinadas faixas de frequências. Assim, com este principio em mente, temos pela frente um problema de resolução do sinal que, para algumas aplicações em sinais de energia, tais como no caso de fenômenos transitórios, representa sérios problemas já que a definição do tamanho ótimo da janela apresenta uma dificuldade adicional.

<sup>7</sup> Werner Karl Heisenberg: físico alemão nascido em Würzburg em 1901. Laureado com dois prêmios Nobel em Física e reconhecido como um dos fundadores da Mecânica Quântica.



**Figura 9** WDFFT do sinal da Figura 7 realizada com janela gaussiana de  $a = 180$ .

No caso da TF, não existe problema de resolução no domínio da frequência dado que se conhecem exatamente quais são as frequências existentes em um determinado sinal. Da mesma forma, tampouco se têm problema de resolução temporal dado que se conhece o valor do sinal para cada instante de tempo. O que dá à TF uma perfeita resolução em frequência é o fato de que a janela utilizada é a função exponencial ( $e^{j\omega t}$ ), a qual existe para todos os instantes de tempo. No entanto, na WDFFT a janela tem comprimento finito dado que somente é aplicada numa parte do sinal (a parte considerada estacionária) produzindo uma diminuição da resolução em frequência e permitindo conhecer somente uma faixa de frequências e não um valor exato das mesmas.

Em consequência, na WDFFT tem-se o compromisso de escolher entre uma boa resolução no tempo ou boa resolução em frequência. Assim, uma janela suficientemente estreita na qual o sinal seja estacionário fornece uma melhor resolução no tempo e, conseqüentemente, uma baixa resolução em frequência. Por tanto, o problema está focado na escolha da janela para a análise, o qual depende também do tipo de aplicação da transformada. Se as componentes frequenciais estão bem separadas umas das outras no sinal original, pode-se poupar a resolução em frequência para melhorar a resolução em tempo. Assim, com uma janela estreita temos boa resolução no tempo e fraca resolução em frequência, no entanto, com uma janela cumprida temos boa resolução no domínio da frequência e fraca resolução temporal.

Com isso surge a necessidade de ter multirresoluções tanto no domínio do tempo quanto da frequência para facilitar a análise de sinais provenientes dos SEP, que tenham uma frequência fundamental sobreposta com transitórios. Mais precisamente, deseja-se uma boa resolução temporal para sinais transitórias de curta duração e alta frequência, e boa resolução em frequência para sinais de longa duração e baixas frequências (ROBERTSON et al., 1996).

Dentro deste contexto, a Transformada Wavelet (TW) foi proposta como ferramenta de análise dos sinais de corrente diferencial no TDP. Na seção seguinte apresentam-se as características básicas da mesma.

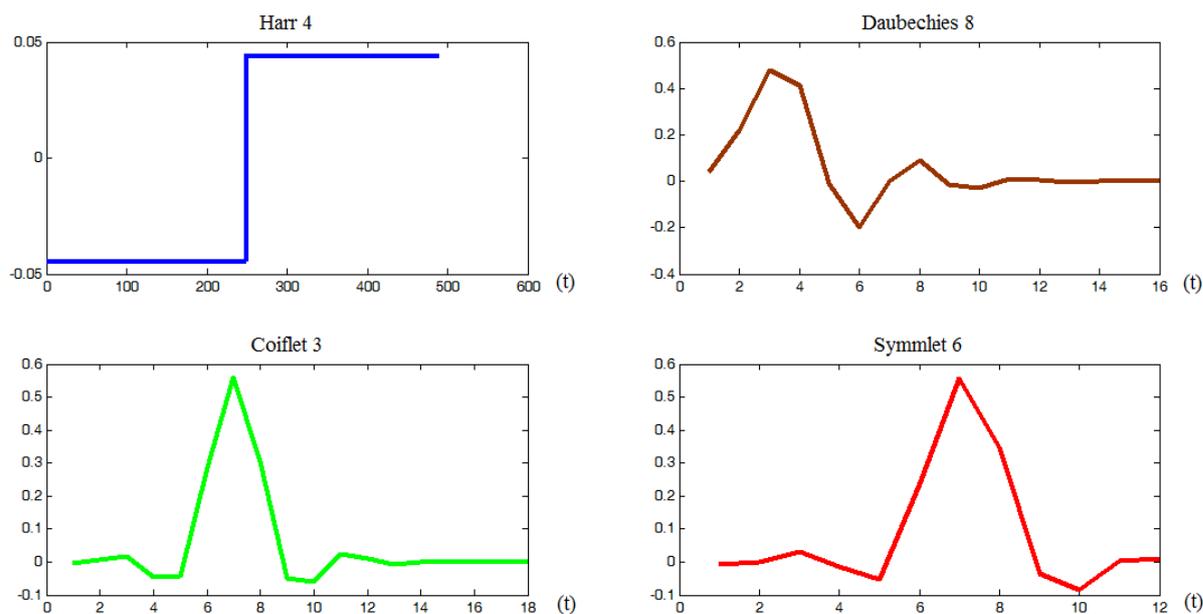
### 3.2.3 Introdução à Transformada Wavelet (TW)

A Transformada Wavelet (TW) de um sinal contínuo no tempo  $x(t)$  é definido como:

$$TW(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) g\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3.7)$$

Assim, como na WDFFT, o sinal  $x(t)$  é multiplicado por uma função análise chamada  $g[(t-b)/a]$  análoga à função  $w(t-\tau)e^{-j2\pi ft}$ .

A função análise  $g(t)$  não se limita ao exponencial complexo. De fato, a única condição de admissibilidade sobre  $g(t)$  é que deve ser estreita e oscilatória, por exemplo, pode ter média zero e decair rapidamente em ambas as extremidades (esta restrição não é tão rigorosa e existe um número infinito de funções com esta característica). Estas características garantem que a integral exposta na equação (3.7) seja finita, dando-se o nome de wavelet ou “pequena onda” à transformada. Assim,  $g(t)$  é chamada de “wavelet mãe” e sua dilatação e deslocamento são simplesmente as “wavelets filhas”. A Figura 10 mostra exemplos de algumas wavelet mães que apresentam natureza não-sinusoidal (ROBERTSON et al., 1996; BENTLEY; McDONNELL, 1994).



**Figura 10** Formas básicas de algumas wavelets mães.

A TW comporta-se como janelas que proporcionam a visualização do sinal no tempo, para intervalos de frequência determinados pela função base (wavelet mãe) e suas decomposições (wavelet filhas). Note-se que, a TW decompõe o sinal a ser estudado em função de sua similaridade com uma determinada wavelet mãe, pré-estabelecida. Esta função é trasladada por todo o sinal, sendo atribuídos coeficientes que significam o quão próximos estão o sinal e a função base ou suas variações (filhas). Observa-se, porém, a importância da escolha da wavelet mãe e sua dependência do tipo de distúrbio analisado, devendo-se levar em conta a semelhança entre o sinal e a função wavelet. Assim, por exemplo, as wavelets mãe tais como Daubechies, Coiflets e Symmlet são largamente utilizadas em eventos de Qualidade de Energia Elétrica. Quanto à classificação dos distúrbios em SEP, diversos índices de mérito são aplicados, tais como, por exemplo, os coeficientes quadrados da TW que permitem extrair as características necessárias para diferenciá-los (SANTOSO et al., 1996).

Destaca-se também a metodologia que relaciona a energia do sinal distorcido com a energia de cada componente da decomposição da Análise Multi-Resolução (AMR), usando o teorema de Parseval. Comparando a curva de desvio padrão dos detalhes referentes ao sistema em regime permanente com a curva de desvio padrão para um determinado distúrbio é possível classificar os diferentes eventos pelas faixas de frequência correspondentes (GAOUDA et al., 1999).

Assim como a WDFT, a TW tem uma contraparte implementável digitalmente, conhecida como Transformada Wavelet Discreta (TWD), dado que a Transformada Wavelet Contínua (TWC) apresenta redundância nas informações e o cálculo das escalas e translações exige um esforço computacional maior. Esse fato restringe a utilização da TWC quando da detecção de

distúrbios eletromagnéticos. No entanto, uma alternativa a esta análise é a discretização dos fatores de escala e translação que dá origem à TWD.

Se os parâmetros de escala ( $a$ ) e translação ( $b$ ) da equação (3.7) forem discretos, tem-se a TWD. A TWD de um sinal contínuo  $x(t)$  é dada por (DINIZ; SILVA; NETTO, 2007):

$$(TWD) (m, p) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,p} dt \quad (3.8)$$

Na equação (3.8)  $\psi_{m,p}$  é a forma base das funções wavelets, criadas a partir de uma wavelet mãe  $\psi_{a,b}$  transladada e dilatada utilizando os parâmetros de translação e dilatação  $m$  e  $p$ , respectivamente.

Assim,  $\psi_{m,p}$  é dada por (DINIZ; SILVA; NETTO, 2007):

$$\psi_{m,p} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi \left( \frac{t - pb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (3.9)$$

A TWD de um sinal discreto  $x[n]$  pode ser expressa também por (KIM; AGGARWAL, 2001):

$$TWD(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_n x[n] \cdot g \left( \frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (3.10)$$

onde a wavelet mãe é dada como sendo:

$$g \left( \frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (3.11)$$

e os parâmetros de escala  $a$  e translação  $b$  são dados em função de parâmetros inteiros  $m$  e  $n$  ( $a = a_0^m$  ;  $b = nb_0 a_0^m$ ) sendo  $a_0 > 1$  e  $b_0 > 0$  constantes, dando origem às wavelet filhas.

### 3.2.4 Principais Diferenças entre a TF e TW

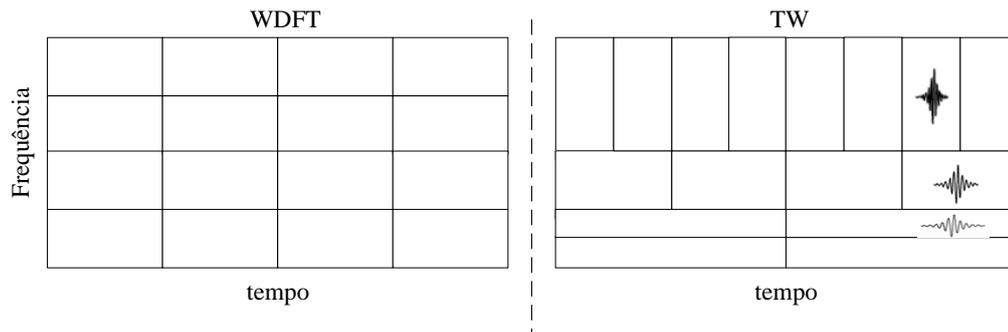
Existem duas características principais na análise wavelet:

- não é necessário calcular a TF do sinal,
- a largura da janela wavelet muda conforme a transformada é calculada para cada componente espectral.

Embora tanto a TF quanto a TW possam ser consideradas como uma rotação do espaço de funções a um domínio diferente, elas apresentam algumas diferenças. A análise de Fourier está associada ao conceito de espectro ou conteúdo de frequência do sinal, enquanto que a análise Wavelet associa-se ao conceito intuitivo de resolução ou escala do sinal (XIONG; RAMCHANDRAN, 2000). A TF decompõe um sinal através de funções base em uma soma ponderada de senos e cossenos, enquanto que a TW utiliza como funções base à próprias wavelets, de frequência variável e duração limitada. A TW de um sinal que muda no tempo depende da frequência e do tempo e por isso é uma ferramenta para análise tempo-frequência que apresenta vantagem em relação ao método tradicional de Fourier (ADDISON, 2002). Outra diferença entre as análises é que as funções senos e cossenos da TF não estão localizados no espaço temporal, ou seja, não dão informação de frequências no tempo, enquanto que as funções wavelet sim fornecem esta informação. Esse comportamento de localização de frequências no tempo faz com que operadores e funções reduzidas se comportem muito bem no domínio wavelet, de forma tal que podem ser utilizados em compressão de dados, detecção de características e eliminação de ruído (GRAPS, 1995). Vale

salientar que a análise de Fourier assume que o sinal estudado é periódico, condição que nem sempre é atendida pelos sinais característicos dos SEP.

Em relação à diferente localização de frequências no tempo, observa-se na Figura 11 a desigual divisão do plano tempo-frequência para a WDFT e para a TW. Cada uma das celas é denominada como cela de Heisenberg (devido ao princípio de incertezas de Heisenberg). Pode-se observar que a relação tempo-frequência da WDFT apresenta a mesma resolução temporal para diferentes frequências, entanto que na TW, o tamanho das celas varia segundo a faixa de frequências permitindo obter diferentes resoluções. Assim, a análise wavelet proporciona informação que poderia ser “oculta” pela análise de Fourier.



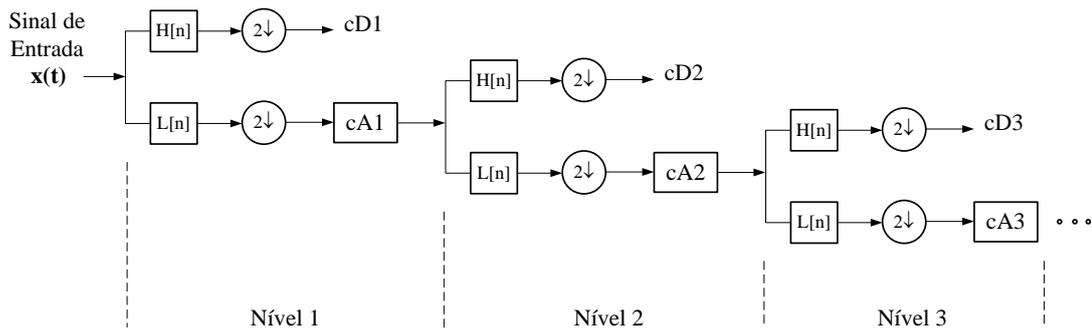
**Figura 11** Plano tempo-frequência para a WDFT e TW.

### 3.3 Análise Multi-Resolução (AMR)

A Análise Multi-Resolução (AMR) é uma técnica que permite tratar um sinal através de filtros passa-baixas e passa-altas, dividindo-a em sub-bandas onde cada sub-banda é analisada individualmente. Realizando a AMR através da TWD, pode-se estabelecer uma dependência tempo-frequência que permite extrair detalhes contidos no sinal original (MALLAT, 1988).

O processo de filtragem elimina determinadas frequências ou bandas de frequências de um sinal, fornecendo “versões” do sinal original relativas aos coeficientes das funções wavelets e funções escalas divididas em aproximações e detalhes. As aproximações são os componentes de baixas frequências e os detalhes são os componentes de alta frequência do sinal (MISITI et al., 1997). As aproximações e detalhes são obtidos através de uma sucessão de processos de convolução onde o sinal original é dividido em diferentes escalas de resolução. O algoritmo de decomposição Multirresolução, ou algoritmo de pirâmide é ilustrado na Figura 12, onde três níveis de decomposição são tomados como exemplo.

O sinal original no domínio do tempo  $x(t)$  é introduzido em dois filtros, um passa-baixos  $L[n]$  e outro passa-altos  $H[n]$  e, na saída dos filtros o sinal é subamostrado por um fator de 2 ( $2\downarrow$ ), objetivando eliminar amostras e evitar a duplicação de informação. A cada estágio de filtragem (níveis de decomposição), tem-se como saídas, sequências de coeficientes de detalhes (cD1) e coeficientes de aproximações (cA1). Em seguida, a aproximação cA1 passa, novamente, através dos filtros e do operador  $2\downarrow$ , decompondo-se em novos coeficientes de detalhe (alta frequência) e aproximação (baixa frequência), com seus respectivos coeficientes wavelets cD2 e cA2. Este processo é repetido diversas vezes até que seja atingido o nível de decomposição desejado (KIM; AGGARWAL, 2001).



**Figura 12** Banco de filtros multi-estágio para AMR (implementação da TWD).

Em relação à Figura 12, os procedimentos da decomposição multirresolução são definidos com:

$$D_j(n) = \sum_k H(k)A_{j-1}(n-k) \quad (3.12)$$

$$A_j(n) = \sum_k L(k)A_{j-1}(n-k) \quad (3.13)$$

onde  $L(k)$  e  $H(k)$  são os vetores dos filtros passa-baixas e passa-altas respectivamente e  $D_j$  e  $A_j$  são os detalhes e aproximações para a resolução  $j$ , sendo  $j = 1, 2, 3, \dots, J$ , respectivamente (KIM; AGGARWAL, 2001).  $A_{j-1}$  é a aproximação do nível imediatamente acima do nível  $j$ . Sendo  $k = 1, 2, \dots, K$ , onde  $K$  é o comprimento do vetor filtro.

Para se ter uma representação não redundante e reconstrução única do sinal original são necessários bancos de filtros em quadratura estando a TW e a AMR intimamente relacionadas. Também, como mostrado na Figura 12, a decomposição wavelet é acompanhada pelo operador  $2\downarrow$  dentro da AMR, que divide o número de amostras por 2 na saída de cada filtro. Isto é feito considerando os dados associados a índices ímpares e rejeitando os de índice par objetivando reduzir as informações duplicadas.

Os filtros passa-baixas e passa-altos são determinados pela função escala e pela função wavelet, respectivamente onde o processamento de sinais usa exclusivamente wavelets ortogonais e de suporte compacto. Algumas wavelets mães que são frequentemente usadas para processamento de sinais são Daubechies, Morlets, Coiflets e Symlets. Estas wavelets apresentam diferentes atributos e desempenhos, quando usadas em aplicações específicas, tais como a detecção de transitórios, compressão de sinais e ruído e por tanto não há critérios definidos para a seleção das wavelets mães (OLIVEIRA; BRETAS, 2009).

### 3.4 Energia Wavelet do Sinal e Espectro de Potência

A energia total contida em um sinal  $x(t)$  é definida como a integral do quadrado da amplitude desse sinal:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \|x(t)\|^2 \quad (3.14)$$

No entanto, para que a equação (3.14) possa ser utilizada, o sinal  $x(t)$  deve ter energia finita. Se por exemplo,  $x(t)$  for uma tensão aplicada a uma resistência ôhmica, a energia convertida em calor, por efeito Joule, é proporcional à integral do quadrado da tensão. A utilização do quadrado da amplitude permite a utilização de sinais complexos dado que considera o módulo do sinal e assim calcula a energia total (LATHI, 1998), (GIROD; RABENSTEIN; STENGER, 2003).

A contribuição relativa da energia contida num sinal para um fator de escala  $a$  e translação  $b$ , específicos, é dada pela função bidimensional de densidade de energia da wavelet (ADDISON, 2002):

$$E(a, b) = |T(a, b)|^2 \quad (3.15)$$

A representação de  $E(a, b)$  é conhecida como escalograma (análogo ao espectrograma) e pode ser integrado entre os limites  $a$  e  $b$  para calcular a energia total do sinal  $x(t)$  usando a constante de admissibilidade,  $C_g$ , como segue:

$$E = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} |T(a, b)|^2 \frac{da}{a^2} db \quad (3.16)$$

A distribuição de energia para um dado fator de escala  $a$  é dada por:

$$E(a) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} |T(a, b)|^2 db \quad (3.17)$$

Através das equações (3.16) e (3.17) obtém-se a energia total do sinal como sendo:

$$E = \int_0^{\infty} E(a) \frac{da}{a^2} \quad (3.18)$$

A equação (3.18) pode ser expressa em termos da banda passante, fazendo-se  $da/a^2 = -df/f_c$ ,  $f = f_c/a$  e  $E_w(f) = E(a)/f_c$ , onde  $w$  significa wavelet. Tem-se então (ADDISON, 2002):

$$E = \int_0^{\infty} E_w(f) df \quad (3.19)$$

Um gráfico de energia wavelet  $E_w(f)$ , chamado como espectro de energia wavelet, apresenta uma área sob a curva igual à energia total e pode ser comparada diretamente com o espectro de energia de Fourier,  $E_F(f)$ , do sinal.

A partir da equação (3.17), pode-se ver que finalmente a energia total do sinal é dada por:

$$E = \frac{1}{C_g f_c} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} |T(f, b)|^2 df db \quad (3.20)$$

onde se define  $T(f, b) = T(a, b)$  para  $f = f_c/a$ .

Por analogia com a análise de Fourier pode-se definir o espectro de potência wavelet como o quadrado da TW. O espectro de potência é o espectro de energia dividido pelo período do sinal estudado. Para um sinal de duração  $\tau$ , o espectro de potencia de Fourier e Wavelet são, respectivamente:

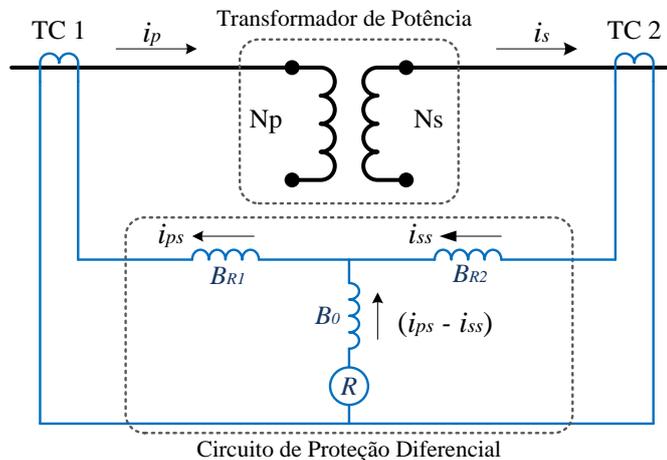
$$P_F(f) = \frac{1}{\tau} E_F(f) \quad (3.21)$$

$$P_W(f) = \frac{1}{\tau} E_w(f) = \frac{1}{\tau C_g f_c} \int_0^{\tau} |T(f, b)|^2 db \quad (3.22)$$

### 3.5 Descrição do Algoritmo de Proteção Proposto

O algoritmo de proteção proposto irá discriminar tanto faltas internas e externas ao transformador quanto caracterizar os distúrbios considerados como não faltosos. Os dados de

entrada do algoritmo são os sinais de correntes diferenciais trifásicas obtidas através dos Transformadores de Corrente (TCs), instalados nos enrolamentos primários e secundários do TDP a ser protegido. Nesta seção, a técnica proposta, baseada na análise das componentes de detalhe da TWD obtidas através da AMR será apresentada. A título de melhor apresentação, considere inicialmente um esquema de proteção monofásico como ilustrado na Figura 13.



**Figura 13** Esquema monofásico de proteção diferencial de transformadores.

A metodologia proposta baseia-se na análise das formas de onda das correntes trifásicas diferenciais. As formas de onda de curtos-circuitos internos ao TDP são típicas (apresentam características bem definidas), com uma clara diferença de amplitude entre a condição permanente e o estado perturbado permitindo detectar o início do distúrbio. Detectado o evento, aplica-se a TWD ao sinal diferencial, que através da AMR, fornece informações no plano tempo-frequência da componente transitória do sinal. Assim, o sinal original será decomposto em diferentes faixas de frequências como resultado da filtragem do sinal que fornece as componentes de detalhe em alta frequência. Este processo é então repetido, até que o máximo nível de decomposição para caracterização dos distúrbios seja atingido. Neste trabalho o sinal de corrente diferencial é decomposto em 5 níveis de detalhe objetivando decompor o sinal nas faixas de frequência características dos eventos estudados.

### 3.5.1 Fundamentação para Classificação de Distúrbios

Quando diferentes fenômenos eletromagnéticos de características transitórias acontecem nas proximidades dos transformadores trifásicos, uma mudança na energia dos coeficientes wavelet da corrente diferencial pode ser percebida (MEGAHED; RAMADAN; ELMAHDY, 2008). Neste sentido, na metodologia proposta utiliza-se como critério de caracterização dos distúrbios a variação de energia espectral do sinal diferencial do transformador.

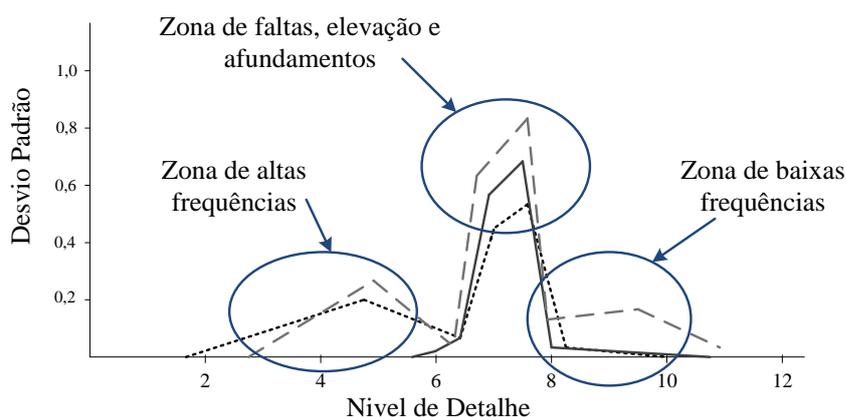
A metodologia de classificação esta baseada no Teorema de Parseval, o qual afirma que a energia do sinal distorcido pode ser obtida em termos de seus coeficientes wavelets (GAUODA et al., 1999).

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c(k)|^2 + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |d_j(k)|^2 \quad (3.23)$$

Usando-se a AMR, decompõe-se o sinal em diferentes níveis de resolução (detalhes), sendo que o número de níveis selecionados objetiva cobrir a faixa de altas frequências de interesse. Em seguida, obtém-se a energia espectral de cada versão de detalhe para diferentes níveis de resolução do sinal distorcido a fim de caracterizar o evento (transitório ou não) que ocorreu no transformador.

A Figura 14 apresenta uma curva da variação de energia (definida pelo desvio padrão) em função dos níveis de detalhe e em função das regiões características de cada faixa de frequências (GAUODA et al., 1999; ARRUDA, 2003). Note-se que nesta curva podem-se identificar três zonas de frequências, a saber:

- a primeira zona, com níveis de detalhe de 2 a 5, mostra o nível de variação de energia para a região características dos eventos de altas frequências,
- a segunda zona, com níveis de detalhe de 5 a 8, mostra a variação de energia espectral para distúrbios tais como: faltas, afundamentos e elevação de tensão,
- por fim, a terceira zona, com níveis de detalhe de 8 a 10, caracteriza o desvio padrão da energia espectral para eventos que acontecem na região de baixas frequências.



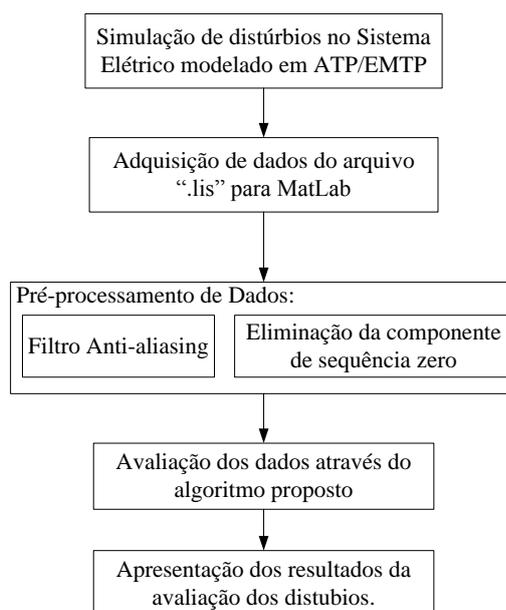
**Figura 14** Espectro wavelet especificando os níveis de detalhe utilizados na classificação dos diferentes tipos de distúrbios (adaptado de GAUODA et al., 1999).

Ressalta-se que a curva apresentada refere-se às características de um sinal de tensão. Neste trabalho, análises semelhantes serão realizadas aplicadas às correntes diferenciais geradas pelos diferentes distúrbios no TDP.

### 3.5.2 Estrutura Geral do Fluxo de Dados

A estrutura lógica do fluxo de dados (fluxo de informações utilizadas pelo algoritmo) é apresentada esquematicamente na Figura 15. Neste trabalho, a primeira fase corresponde aos dados de entrada obtidos através de simulações dos distúrbios. As simulações foram efetuadas sob um sistema elétrico de proteção diferencial de transformador modelado no *software* ATP/EMTP. Nesta etapa vários distúrbios elétricos, tais como: faltas internas, faltas externas, energização e sobre-excitação, foram simulados objetivando gerar sinais característicos que permitam identificar cada evento.

A etapa de pré-processamento é importante e constitui-se de duas sub-rotinas, a saber: filtro *anti-aliasing* e eliminação da componente de sequência zero. A filtragem *anti-aliasing* é necessária em virtude da possível presença de ruídos de alta frequência no sinal de corrente proveniente dos TCs. Muito embora estes sinais sejam compostos, na sua maior parte, por componentes à frequência industrial (60 Hz), alguns fatores podem causar o surgimento de componentes indesejáveis de alta frequência podendo provocar distúrbios e erros de digitalização (OPPENHEIM; SCHAFER, 1998). Neste trabalho foi utilizado um filtro passa-baixas do tipo *Butterworth* de segunda ordem, com frequência de corte de 30 kHz e o filtro *anti-aliasing* é aplicado às correntes provenientes dos TCs instalados em ambos os lados do TDP.



**Figura 15** Estrutura geral do fluxo de dados da metodologia proposta.

A eliminação da componente de sequência zero será aplicada apenas nos enrolamentos ligados em Y, pois na ocorrência de faltas desequilibradas envolvendo a terra as componentes de sequência zero serão naturalmente filtradas nos enrolamentos ligados em  $\Delta$  e para que não haja desequilíbrios indesejáveis na corrente diferencial (correntes diferenciais não relacionadas aos distúrbios estudados), essas componentes devem também ser filtradas no lado do enrolamento em Y (IEEE Std. C37.91, 2008).

A seguinte etapa do fluxo de dados relaciona-se com a avaliação dos dados pré-processados pelo algoritmo proposto baseado na variação de energia espectral dos coeficientes wavelet. Esta etapa será apresentada em detalhe na seção seguinte.

### 3.5.3 Estrutura Geral do Algoritmo de Proteção

O fluxograma do algoritmo de proteção é apresentado na Figura 16 onde se ilustra o esquema de decisão lógica da metodologia proposta o qual foi desenvolvido em ambiente MATLAB®. Nessa, as correntes trifásicas diferenciais são obtidas através dos secundários dos TCs conectados nos enrolamentos primários e secundários do TDP a ser protegido. O funcionamento detalhado do esquema de proteção descreve-se a seguir.

#### 3.5.3.1 BLOCO 1: Detecção do Distúrbio

##### Passo (a)

O algoritmo inicia-se com a aquisição dos sinais de corrente provenientes do circuito de simulação modelado no *software* ATP/EMTP. Neste trabalho as correntes diferenciais trifásicas no TDP são amostradas a uma frequência de 500 amostras por ciclo (30 kHz) onde a escolha da frequência de amostragem foi feita com o objetivo de atender o compromisso de obter um algoritmo rápido e ter uma quantidade suficiente de coeficientes wavelets para efetuar a análise. As relações de transformação dos TCs utilizados nas simulações foram: TDP de 30 MVA, 2.000/5 – 200/5 e TDP de 150 MVA, 500/5 – 1.500/5. Os TCs foram modelados objetivando a consideração da saturação dos mesmos nas simulações.

### Passo (b)

A primeira operação de cálculo feita pelo algoritmo é a determinação das correntes trifásicas diferenciais,  $I_d^{ABC}$ , obtidas através das correntes trifásicas amostradas no passo (a):

$$I_d^{ABC} = (\vec{i}_{ps} - \vec{i}_{ss})^{A, B, C} \quad (3.24)$$

onde:

$\vec{i}_{ps}, \vec{i}_{ss}$  correntes secundárias dos TCs para as fases A, B e C [A].

Quando qualquer uma das correntes diferenciais calculadas através da equação (3.24) ultrapassa um valor limiar pré-definido, cálculos para a análise das correntes diferenciais são inicializados. O limiar de corrente é calculado como a corrente de restrição de um relé diferencial convencional, ou seja, como a média das correntes secundárias dos TCs (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Neste documento esta corrente será chamada de corrente de ativação.

O cálculo da corrente de ativação é feito para cada uma das fases e a equação (3.25) a seguir apresenta a formula utilizada nesta metodologia:

$$I_a^{ABC} = k \cdot I_m = k \cdot \frac{(\vec{i}_{ps} + \vec{i}_{ss})^{A, B, C}}{2} \quad (3.25)$$

onde:

$I_a^{ABC}$  corrente de ativação do Bloco 2 para as fases A, B e C em [A];

$k$  característica diferencial percentual do transformador;

$I_m$  corrente média de restrição [A].

$\vec{i}_{ps}, \vec{i}_{ss}$  correntes secundárias dos TCs para as fases A, B e C [A].

A regulação da corrente de ativação é feita através da variável  $k$ , conhecida como característica diferencial percentual. Este fator de sensibilidade é utilizado para prevenir falsas operações do relé devido à saturação dos TCs ou mudanças bruscas de *tap* no TDP. O valor de  $k$  se expressa como um valor percentual, cujos valores característicos são 10 %, 20 % e 40 %. É importante salientar que um relé com uma constante de ativação  $k$  igual a 10 % será mais sensível que um relé com constante 40 % (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

### Passo (c)

Nesta etapa, o algoritmo de proteção compara a amplitude da corrente diferencial com a amplitude da corrente de ativação, como indica a equação (3.26). Essa comparação é feita para todas as fases. Quando qualquer uma das correntes trifásicas diferenciais ultrapassa o valor de ativação ( $I_a$ ) pré-definido o BLOCO 2 do algoritmo ativa-se e começa a analisar o sinal diferencial através das energias de cada detalhe da decomposição wavelet. Se nenhuma dessas correntes trifásicas ultrapassa a corrente de ativação, então um próximo período de amostragem é considerado e o passo (a) executa-se novamente.

Assim, a condição de ativação do BLOCO 2 é dada pela seguinte equação:

$$\left| I_d^{ABC} \right| \geq \left| I_a^{ABC} \right| = \left| k \cdot I_m \right| = \left| k \cdot \frac{(\vec{i}_{ps} + \vec{i}_{ss})^{A, B, C}}{2} \right| \quad (3.26)$$

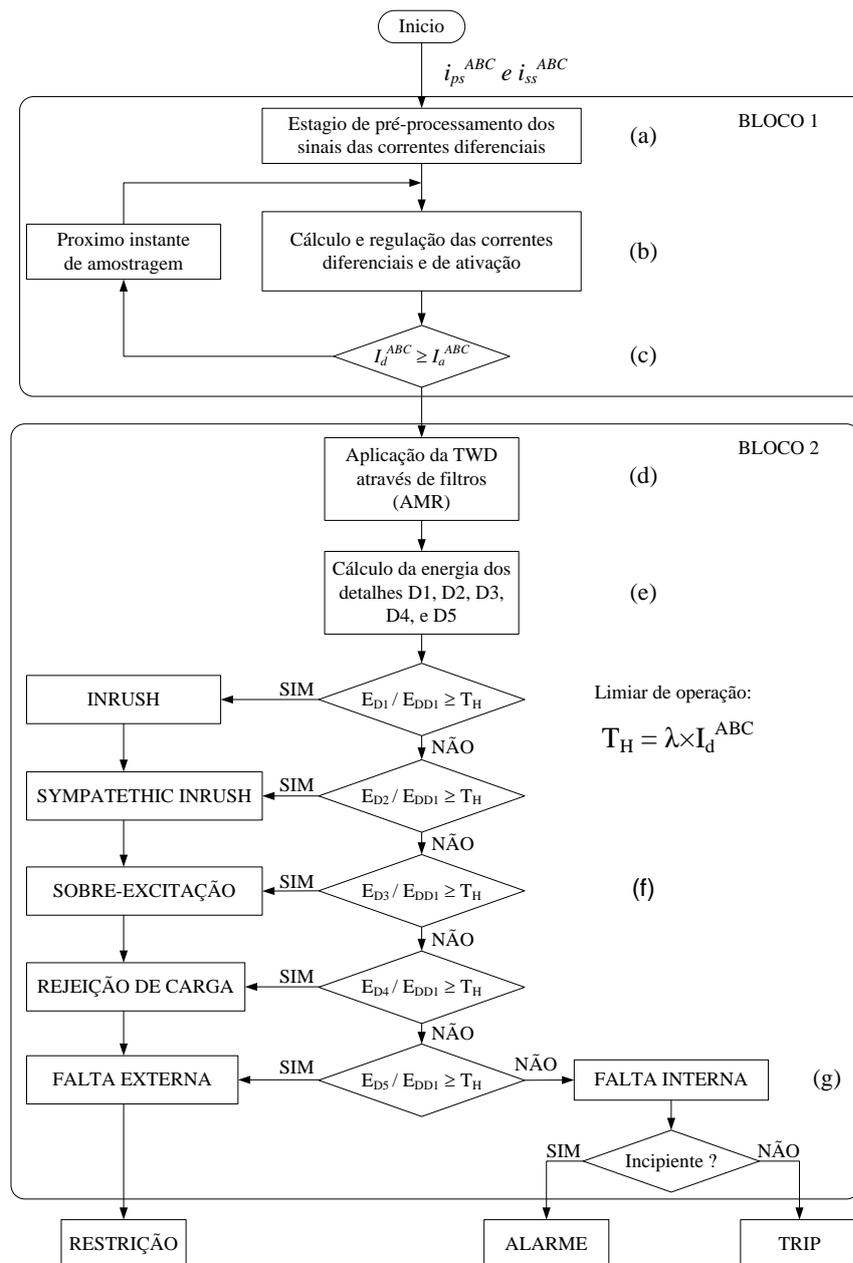


Figura 16 Fluxograma geral da metodologia de proteção proposta.

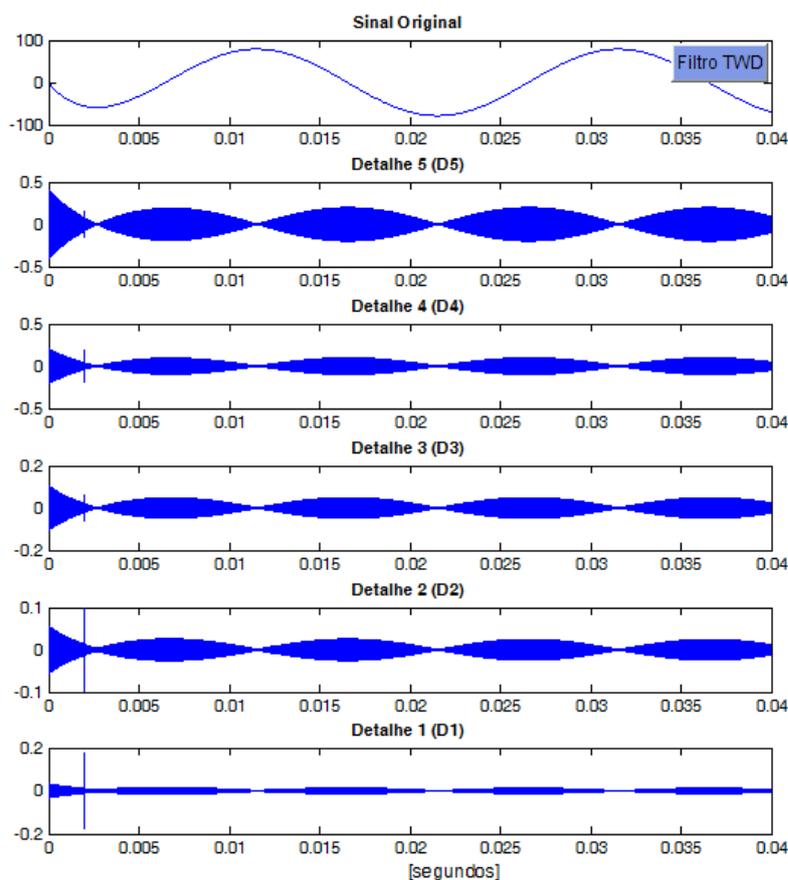
### 3.5.3.2 BLOCO 2: Discriminação dos Distúrbios

#### Passo (d)

Quando a condição expressa pela equação (3.26) é atingida por qualquer uma das correntes trifásicas diferenciais o algoritmo inicia a etapa de discriminação do distúrbio. Neste passo, as correntes diferenciais que ativaram o Bloco 2 são processadas inicialmente pela Transformada Wavelet Discreta (TWD). Um banco de filtros passa-baixa e passa-altas, configurados em uma estrutura piramidal como a mostrada na Figura 12, conforma a base da Análise Multi-Resolução (AMR) do algoritmo. Assim, o sinal original de corrente diferencial é dividida em varias faixas de frequências que são apresentadas através de aproximações e detalhes nas saídas do banco de filtros.

A Figura 17 apresenta, por exemplo, a decomposição em aproximações e detalhes de uma corrente diferencial correspondente a uma falta interna sólida monofásica no enrolamento

secundário de um TDP de 30 MVA. A corrente diferencial apresenta um valor máximo de 80A e é amostrada a uma frequência de 30 kHz sendo posteriormente decomposta em 5 faixas de frequências chamadas detalhes. Segundo o critério de *Nyquist*<sup>8</sup> a máxima frequência que pode ser observada no sinal é 15 kHz ficando dividido nas seguintes faixas de frequências: 15–7,5 kHz (detalhe 1), 7,5–3,75 kHz (detalhe 2), 3,75–1,875 kHz (detalhe 3), 1,875–0,9375 kHz (detalhe 4) e 0,9375–0,4687 kHz (detalhe 5). Para esta situação faltosa, fica evidente que o nível de energia espectral (calculada através dos coeficientes de detalhe) é diferente em cada faixa de frequência na qual o sinal de corrente diferencial foi dividido.

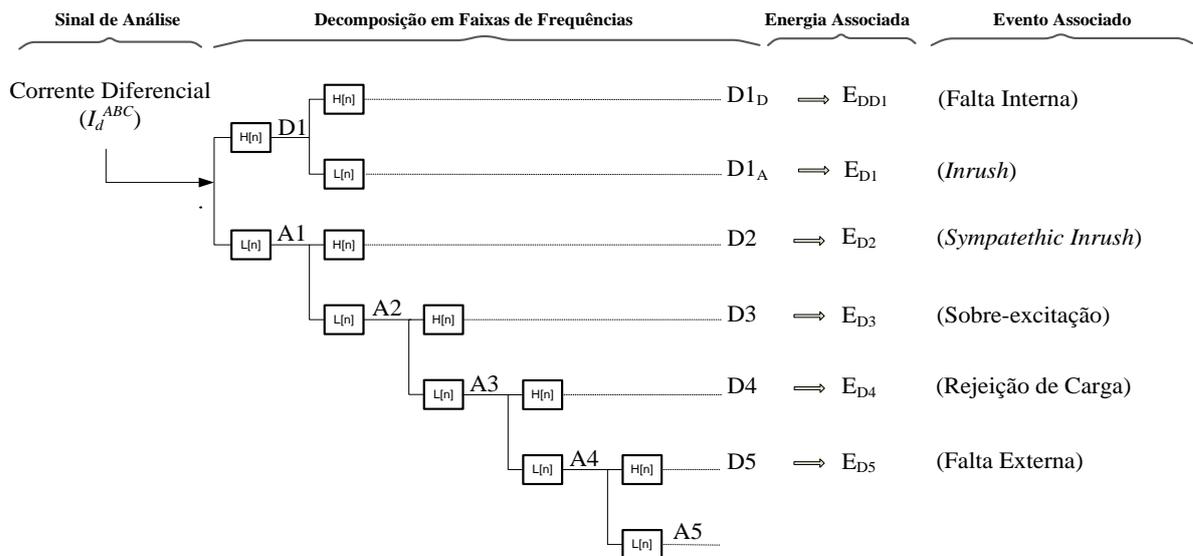


**Figura 17** Decomposição da corrente diferencial em diferentes faixas de frequências (detalhes) através da TWD.

### Passo (e)

Depois do sinal de corrente diferencial ser decomposto em cinco faixas de frequência através do banco de filtros, o algoritmo calcula a energia espectral associada aos coeficientes wavelet para os detalhes D1 a D5 objetivando discriminar os diferentes distúrbios no TDP através da variação de energia em cada um dos detalhes. Esta energia espectral é quantificada através da somatória dos coeficientes de detalhe ao quadrado considerando uma janela de dados pré-determinada de 1/2 ciclo (8,33 milissegundos). A Figura 18 ilustra a decomposição do sinal de corrente diferencial em 5 níveis de detalhes considerados neste trabalho e mostra qual o evento associado aos mesmos. Vale salientar que a faixa de frequências correspondente a cada detalhe depende diretamente da taxa de amostragem do sinal de corrente diferencial.

<sup>8</sup> Segundo o critério de *Nyquist*, a frequência de amostragem de um sinal precisa ser no mínimo o dobro da maior frequência de interesse contida no sinal.



**Figura 18** Representação das energias calculadas para cada nível de detalhe da TWD.

Percebeu-se que em condições normais de funcionamento de TDPs a variação de energia espectral observada nos coeficientes de cada detalhe wavelet é baixa. O mesmo acontece quando faltas externas acontecem “longe” do transformador, por exemplo, em linhas de transmissão. Por outro lado, faltas internas repentinas e incipientes geram componentes de alta frequência na faixa de 15 kHz que caracterizam estes distúrbios através da energia espectral associada às componentes de detalhe da decomposição wavelet. Assim, a energia dos coeficientes de detalhe associados a uma determinada faixa de frequência apresenta valores distintos perante diferentes situações operacionais do transformador (faltas internas, faltas externas, energização de transformadores, sobre-excitação e rejeição de carga). Neste sentido, cada evento encontra-se relacionado à variação de energia espectral de um determinado detalhe wavelet.

### Passo (f)

Nesta etapa o algoritmo proposto discrimina os distúrbios considerando o valor da energia espectral calculada no passo anterior. Cada evento é caracterizado através de uma relação de energias espectrais, como mostrado na Figura 16, permitindo que eventos simultâneos sejam identificados, por exemplo, faltas internas acontecendo junto à energização do transformador ao mesmo tempo. Nesse sentido, como mostrado na Figura 18, foi necessário dividir o detalhe D1 em dois níveis de decomposição (D1<sub>D</sub> e D1<sub>A</sub>), para utilizar uma faixa de mais altas frequências na detecção de faltas internas. Assim, a energia do detalhe D1<sub>D</sub> (E<sub>DD1</sub>) é utilizada para caracterizar faltas internas e a energia do detalhe D1<sub>A</sub> (E<sub>D1</sub>) utiliza-se para discriminar correntes de *inrush*.

Objetivando fazer o algoritmo de proteção independente do sistema elétrico, ou seja, fazer a metodologia proposta adaptativa a outras configurações elétricas, propõe-se neste trabalho um limiar  $T_H$  variável (adaptativo). Nesse sentido, este limiar de operação do relé foi programado para ser dependente da corrente diferencial do circuito de proteção do transformador. Assim, o valor limiar  $T_H$  é calculado para cada fase do TDP como:

$$T_H = \lambda \cdot I_d^{ABC} = \lambda \cdot \left| (\vec{i}_{ps} - \vec{i}_{ss})^{ABC} \right| \quad (3.27)$$

onde:

- $\lambda$  sensibilidade do algoritmo às variações de energia dos coeficientes wavelet;
- $I_d^{ABC}$  corrente diferencial no TDP;

A Figura 19 ilustra a mudança do valor limiar  $T_H$  em função do valor de corrente diferencial. Observa-se que  $T_H$  será maior quanto maior for o valor de corrente que esta sendo decomposta pelo filtro wavelet. Vale salientar que o limiar é definido antes da decomposição do sinal pelo banco de filtros wavelets, ou seja, é definido ainda no Bloco 1. Assim, com esta definição para o valor limiar tem-se uma metodologia de proteção adaptativa.

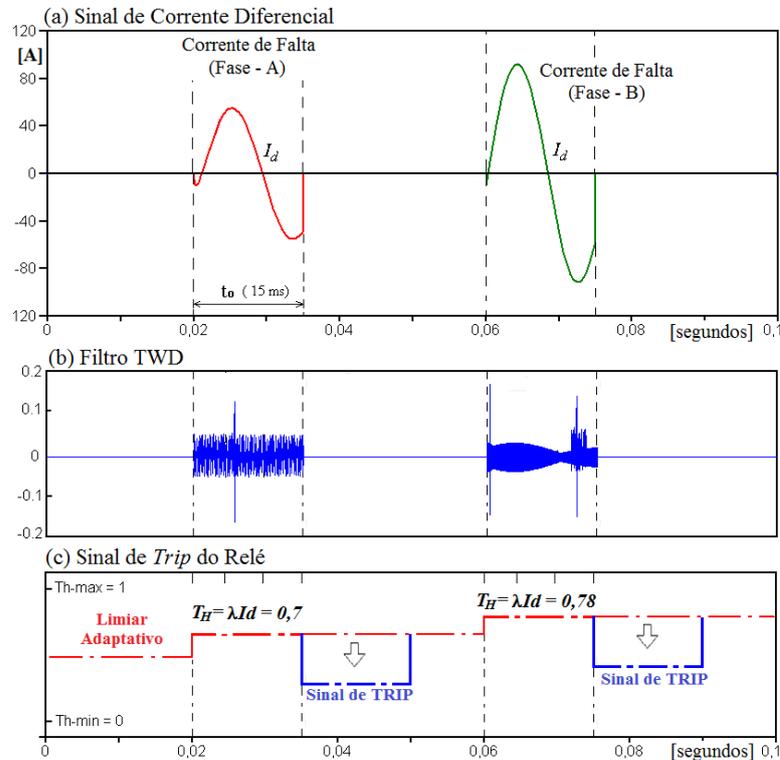


Figura 19 Representação da adaptabilidade do valor limiar  $T_H$  (OLIVEIRA et al., 2012a).

### Passo (g)

As relações entre energias espectrais definidas na etapa (f) são utilizadas para caracterizar os eventos não-faltosos ou faltas externas ao transformador. Assim, uma vez verificado que nenhuma relação entre energias satisfaz as condições para caracterização deste tipo de distúrbios, o algoritmo acaba o processo de decisão discriminando o evento como sendo uma Falta Interna. No entanto, ainda resta definir se a falta interna é incipiente (menos de 10% do enrolamento) ou repentina (atingiu 100% do enrolamento), para o qual o passo (g) é ativado.

Para conseguir isso, o algoritmo utiliza a Transformada Janelada de Fourier (TJF) e a aplica sobre o sinal de corrente diferencial determinando o espectro de frequências da mesma. Nesse sentido, foi verificado através de simulações que as correntes diferenciais correspondentes a faltas internas repentinas em 100% do enrolamento apresentam uma componente fundamental bem destacada das demais componentes espectrais. Da mesma forma, faltas internas incipientes que acontecem em menos de 10% do enrolamento caracterizam-se por ter 3° harmônicas maiores às das faltas internas repentinas. Assim, uma relação entre a 1° e 3° harmônica da corrente diferencial, quando esta é discriminada como falta interna, é utilizada pelo algoritmo para identificar faltas incipientes no TDP. Esta discriminação é feita segundo a seguinte relação:

$$\frac{3_H}{1_H} \geq 1.5 \quad \text{falta interna incipiente (menos de 10\% do enrolamento faltoso)} \quad (3.28)$$

Assim, nesta última etapa o algoritmo de proteção identifica, discrimina e informa o tipo de distúrbio que aconteceu no TDP e toma a decisão de restringir ou ativar a operação do disjuntor de proteção ou, caso contrário, enviar um sinal de alarme. Vale salientar que a relação entre a 3ª e 1ª componente harmônica, utilizada na discriminação de faltas incipientes, foi obtida em forma heurística.

### **3.6 Sumário**

Neste capítulo foram apresentadas as principais características da TW e da TF fazendo uma análise comparativa entre ambas as ferramentas a fim de justificar a escolha na utilização da TW neste trabalho. As características da TW fazem com que seja uma poderosa ferramenta de análise e caracterização de fenômenos transitórios em SEP. A sua construção computacional através de banco de filtros digitais permite fazer uma AMR do sinal de corrente diferencial e sua decomposição em varias faixas de frequência foi aplicada e utilizada no desenvolvimento da metodologia de proteção proposta.

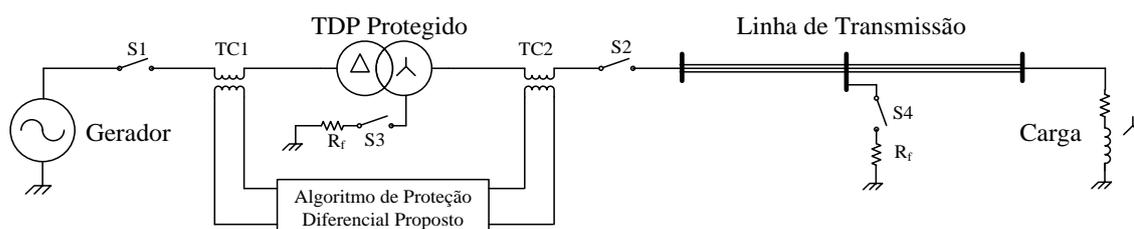
A variação de energia espectral que é visualizada nos coeficientes de detalhe da TWD perante um distúrbio elétrico transitório é utilizada nesse algoritmo como fator de discriminação entre os diferentes eventos considerados. Essa variação de energia torna-se maior em determinadas componentes de detalhe wavelet, em função do distúrbio simulado, e a decomposição do sinal de corrente diferencial em 5 níveis de detalhe serve como sinal de análise.

## 4. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Objetivando analisar o potencial da metodologia desenvolvida, neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através da utilização do algoritmo proposto para proteção diferencial de Transformadores de Potência (TDP). O algoritmo foi testado através de estudos de caso onde os dados elétricos dos equipamentos que constituem o Sistema Elétrico de Potência (SEP) estudado, bem como as considerações sobre os modelos elétricos utilizados são inicialmente apresentados. O detalhamento dos casos estudados e analisados pela metodologia proposta são discutidos também nesta seção onde se apresenta uma análise do desempenho do algoritmo proposto frente a diferentes condições de operação dos TDP. Finalmente, um estudo do desempenho da metodologia proposta quando utilizadas diferentes funções wavelets é apresentada junto a uma análise comparativa com a metodologia de proteção convencional.

### 4.1 Sistema Elétrico Estudado

O SEP utilizado como base para os estudos de caso foi simulado no *software* ATP/EMTP (BPA, 2010). Os estudos realizados compreendem a simulação numérica de diversos casos de interesse os quais serão detalhados posteriormente. A Figura 20 ilustra o sistema elétrico utilizado para a geração dos sinais de corrente nos pontos de localização da proteção diferencial do TDP.



**Figura 20** Esquema representativo do sistema elétrico modelado no ATP/EMTP.

O sistema elétrico é composto por um gerador que fornece a tensão primária a um TDP trifásico. Foram avaliados três tipos de TDP objetivando testar o desempenho da metodologia perante diferentes transformadores e diferentes grupos de conexão<sup>9</sup>. Transformadores de Corrente (TCs) com diferentes relações de transformação foram conectados nos enrolamentos primários e secundários dos transformadores com o objetivo de medir as correntes nos enrolamentos e permitir o sensoriamento das correntes diferenciais trifásicas.

<sup>9</sup> Grupos de conexão referem-se à forma de conexão dos enrolamentos primários e secundários dos transformadores.

No sistema elétrico estudado, o TDP fornece energia a uma carga indutiva trifásica através de uma Linha de Transmissão (LT) de 100 km de comprimento. Os disjuntores S1 e S2, apresentados na Figura 20, são utilizados para simular a manobra de energização e remoção de faltas externas ao TDP. No caso de energização, o transformador é conectado a vazio e com vários níveis de carga e a saturação dos TCs é considerada em todos os casos simulados. A chave S4 é fechada através de uma resistência de falta ( $R_f$ ) quando da simulação de uma falta externa na LT. Já o fechamento da chave S3 simula faltas internas ao transformador, tanto no enrolamento primário quanto no enrolamento secundário. Essa última simulação é realizada também através de uma resistência de falta  $R_f$  que adota diferentes valores os quais serão detalhados posteriormente.

## 4.2 Modelagem da Rede Elétrica no ATP/EMTP

O ATP (*Alternative Transient Program*), baseado no EMTP (*Electromagnetic Transient Program*), foi desenvolvido nos anos 60 pela BPA – *Bonneville Power Administration*. Este *software* é utilizado nas mais diversas pesquisas que envolvem o estudo de fenômenos eletromagnéticos transitórios em uma ampla faixa de frequências permitindo a simulação digital de redes polifásicas com diversas configurações. O ATPDraw é uma interface gráfica que foi desenvolvida objetivando uma melhor interação com o usuário e apresenta amplas capacidades de modelos para LTs, cabos, disjuntores, cargas, conversores, dispositivos de proteção, elementos de controle (TACS), elementos não lineares e acoplamentos eletromagnéticos. Esta variedade de dispositivos e equipamentos permite uma fácil entrada de dados para modelagem de varias topologias de SEP.

Sabendo-se que um programa digital não permite obter uma solução contínua no tempo, são calculados valores a intervalos de tempo discretos. Desse modo, os algoritmos do programa permitem a representação de não linearidades, elementos a parâmetros concentrados e distribuídos, chaves, transformadores, bancos de capacitores, entre outros. De um modo geral, são considerados parâmetros em componentes de fase, em sequência positiva e/ou em sequência zero, dependendo do modelo. Neste trabalho, a modelagem do sistema elétrico foi desenvolvida no ambiente do ATPDraw Versão 5.7p3 (BPA, 2010). Este programa possui muitos recursos gráficos, permitindo a criação e edição dos arquivos contendo a topologia do sistema, além de gerenciar a execução do programa principal. Os principais componentes utilizados na concepção do SEP utilizado no estudo de caso, bem como as suas características, são descritas nas subseções a seguir.

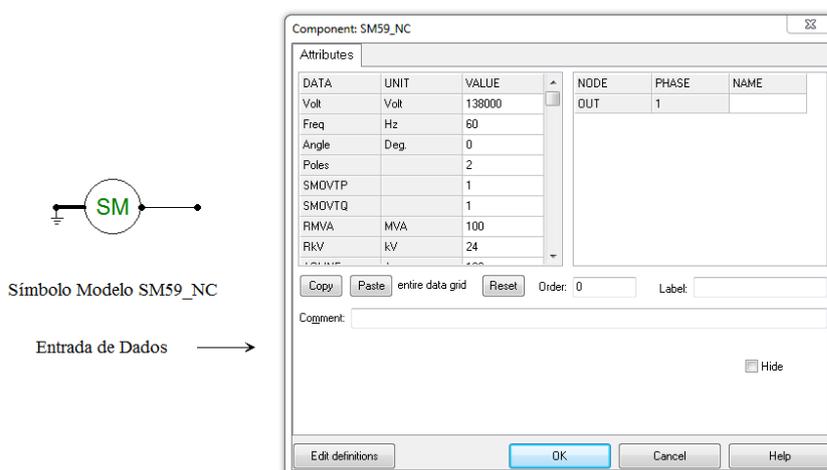
### 4.2.1 Descrição dos Elementos Utilizados na Modelagem do SEP

Utilizando-se a interface ATPDraw foi modelado o SEP apresentado na Figura 20. Neste sistema elétrico, o gerador síncrono foi modelado com um bloco SM59\_NC. As LTs trifásicas foram consideradas como idealmente transpostas e modeladas com parâmetros distribuídos e dependentes da frequência, pelo bloco LCC; o transformador trifásico com curva de saturação foi representado com o modelo HYBRID (HOIDALEM et al., 2007), e as cargas utilizadas são trifásicas estáticas tipo RLC3 com parametrização independente para cada fase. Além disso, consideraram-se chaves de tempo controlado SWIT\_3XT com as quais são impostas as diversas contingências sob o transformador. Os *probes* trifásicos de corrente foram usados para adquirir os sinais a serem processados no MATLAB® (MATLAB, 2012).

#### 4.2.1.1 Gerador

O gerador utilizado na modelagem do SEP é representado por uma Máquina Síncrona denominada SM59\_NC. Seu símbolo e a janela de parametrização são apresentados na Figura

21. Trata-se de um modelo de máquina síncrona balanceada em regime permanente e sem saturação, que incorpora uma representação detalhada das partes eletromecânicas, cuja resolução das equações elétricas é baseada na Transformada de Park, empregando uma sofisticada interface com a rede elétrica. Este modelo considera as equações de tensão diferencial nos eixos direto e em quadratura e representa a dinâmica da máquina em regime transitório e sub-transitório. Para os casos de estudos de sobre-excitação do transformador a frequência de geração da máquina síncrona foi alterada em  $\pm 5\%$  objetivando simular o efeito da sobre e sub-frequência sob as correntes diferenciais transitórias.

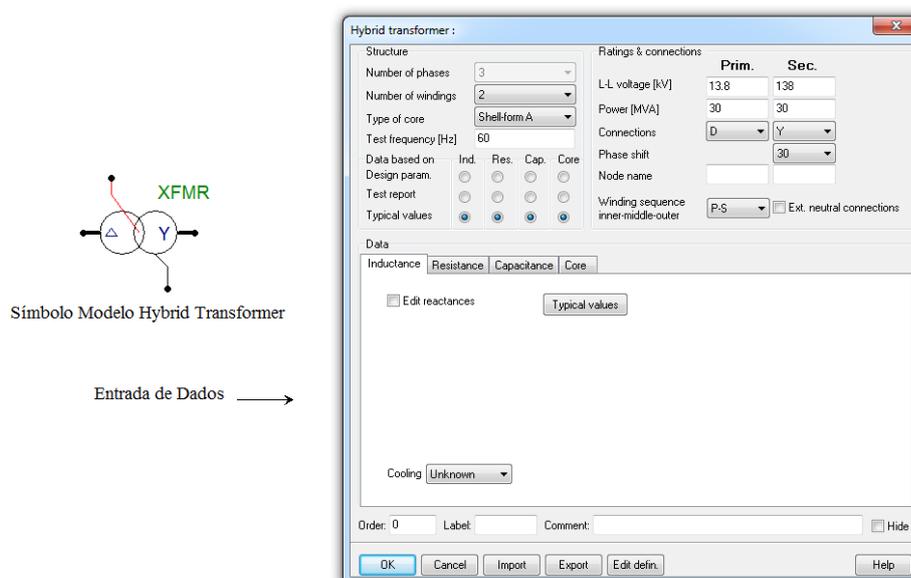


**Figura 21** Símbolo e janela de parametrização no ATPDraw de máquina síncrona –SM59\_NC.

#### 4.2.1.2 Transformador de Potência (TDP)

O TDP deve ser modelado considerando sua característica de saturação, a qual tem influência nas sobre-tensões resultantes. O conhecimento da característica da curva de saturação do transformador é de grande importância em estudos que envolvem fenômenos de energização. Diante disso, o modelo utilizado neste trabalho considera as impedâncias de dispersão dos enrolamentos e as suas conexões, além da curva de saturação cuja característica é muito importante nos estudos das correntes *inrush* no transformador.

A Figura 22 apresenta o símbolo e a janela de parametrização do modelo *Hybrid Transformer* o qual foi utilizado nas simulações de energização, falta interna em 100 % do enrolamento, falta externa, sobre-excitação, energização solidária e rejeição de carga. Para a simulação de faltas incipientes foi utilizado o modelo saturável (SATTRAFO) dada a possibilidade de modificar os dados das matrizes de resistência e impedância do transformador quando da simulação de faltas que envolvem parte das espiras do enrolamento do transformador. Além disso, o modelo saturável é recomendado para simulação de faltas internas (BASTARD; BERTRAND; MEUNIER, 1994).



**Figura 22** Símbolo e entrada de dados no ATPDraw do modelo *Hybrid Transformer*.

Vale salientar que o desempenho da metodologia de proteção diferencial proposta neste trabalho foi testado em três diferentes TDP. A Tabela 3 apresenta os dados principais dos transformadores utilizados como estudo de caso e sob os quais foram simulados os diferentes eventos estudados.

**Tabela 3** Principais características técnicas dos TDP utilizados no estudo.

Denominação	Potência Nominal [MVA]	Tensão Primária [kV]	Tensão Secundária [kV]	Conexão
TDP1	30	13,8	138	$\Delta - Y$
TDP2	150	230	69	$\Delta - Y$
TDP3	150	230	69	$Y - Y$

#### 4.2.1.3 Transformador de Corrente (TC)

Qualquer sistema elétrico constituído de um TDP ligado em  $Y-\Delta$  ou  $\Delta-Y$  apresenta uma defasagem angular de  $30^\circ$  entre as correntes dos lados primários e secundários do transformador (MONSEF; LOTFIFARD, 2007). Essa defasagem entre as correntes do TDP pode provocar correntes diferenciais importantes nos secundários dos TCs e, para corrigir esse problema na prática se conecta os TCs de maneira inversa às ligações do transformador principal. Dessa forma, para um transformador ligado em  $Y-\Delta$ , por exemplo, usam-se os TCs conectados em  $\Delta-Y$ , e vice-versa (CAMINHA, 1997). No entanto, como descrito no Capítulo 3, neste trabalho foi construída uma sub-rotina no algoritmo de proteção encarregada de corrigir a defasagem angular produzida por determinados grupos de conexão do TDP.

As características utilizadas para a modelagem dos TCs foram tomadas de (FOLKERS, 1999) que recomenda a utilização do modelo clássico do Transformador Saturável (modelo STC do ATP/EMTP) considerando os seguintes fatores importantes:

1. o enrolamento secundário se utiliza como sendo o enrolamento primário para a modelagem dos TCs,
2. no enrolamento secundário se ajusta o valor de resistência em  $0 \Omega$  e a indutância secundária deve ser distinta de zero dado o fato de o enrolamento secundário sempre

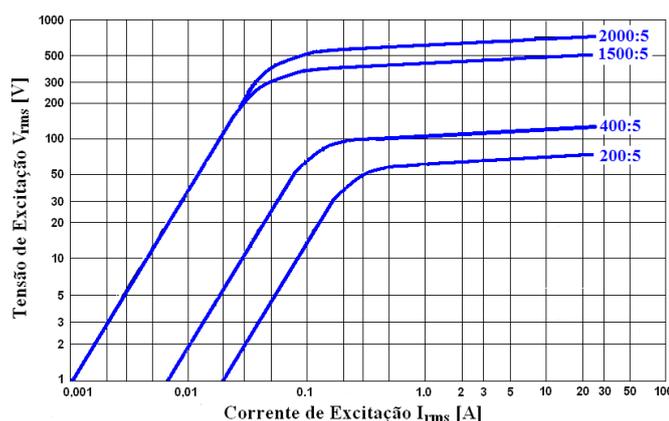
operar em curto-circuito ou carregado com baixa impedância de carga (DE MELLO, 1979),

3. a indutância primária ajusta-se a zero, já que na prática a indutância do primário dos TCs é desprezível,
4. a resistência do enrolamento primário ajusta-se ao valor da resistência do enrolamento secundário dos TCs,
5. a resistência de magnetização pode ajustar-se a infinito, considerando que na prática ela é muito grande. No *software* ATP/EMTP esse ajuste é feito colocando um valor zero no quadro correspondente ao valor de  $R_{mag}$ .

Vale salientar que os TCs foram calculados em função das correntes nominais dos TDP utilizados nas simulações e as curvas de saturação foram escolhidas segundo (IEEE Std C37.13-2008). Assim, os TCs utilizados apresentam as seguintes relações de transformação:

- TDP de 30 MVA: TCs de 2.000/5 no primário e 200/5 no secundário,
- TDP de 150 MVA: TCs de 400/5 no primário e 1.500/5 no secundário.

A Figura 23 ilustra a curva de saturação dos TCs utilizados no circuito diferencial de proteção.



**Figura 23** Curva de saturação dos TCs de utilizados nas simulações (IEEE Std. C57.13, 2008).

#### 4.2.1.4 Linha de Transmissão (LT)

Os modelos de LTs disponíveis no ATP/EMTP atendem às necessidades mais frequentes dos estudos de fenômenos transitórios. Assim, dentre as características que podem ser selecionadas para modelagem da LT temos: geometria da torre, tipo de acoplamento, resistividade do solo e parâmetros concentrados ou distribuídos dependentes ou não da frequência. Neste trabalho a modelagem da LT considerou a variação dos parâmetros com a frequência de forma a evitar imprecisões nos resultados, principalmente quando do estudo de faltas externas ao TDP as quais são simuladas sobre a LT. Neste sentido, algumas das varias opções para modelagem de LTs no ATPDraw são:

- Bergeron: é um modelo a parâmetros distribuídos, incluindo o fenômeno de ondas viajantes, contudo ele representa as resistências da linha em ambos os terminais (nós) como elementos concentrados.
- PI: é o modelo PI equivalente nominal a parâmetros concentrados.
- Semlyen: é um modelo simples, sendo um dos primeiros modelos de LT dependentes da frequência. No entanto, pode gerar imprecisão ou soluções instáveis em estudos de fenômenos de altas frequências.

- Noda: é um modelo dependente da frequência, que representa LTs e cabos diretamente no domínio de fase.
- JMarti: modelo dependente da frequência com matriz de transformação constante, que é adequada à simulação do fenômeno de ondas viajantes em LTs longas. Tal modelo tem sido adotado em muitos trabalhos e apresenta uma boa correlação com as respostas das linhas reais.

Os modelos descritos acima estão contidos dentro do bloco *Line/Cable Constants (LCC)* onde também podem ser levadas em consideração características como: transposição, efeito *skin*, acoplamento, sistema de unidades a adotar, tipo de linha, configuração dos condutores, entre outros. Dado o foco do estudo, o modelo de LT utilizado neste trabalho foi o modelo JMarti (MARTI, 1982) e a Figura 24 mostra o símbolo e janela de parametrização deste modelo.

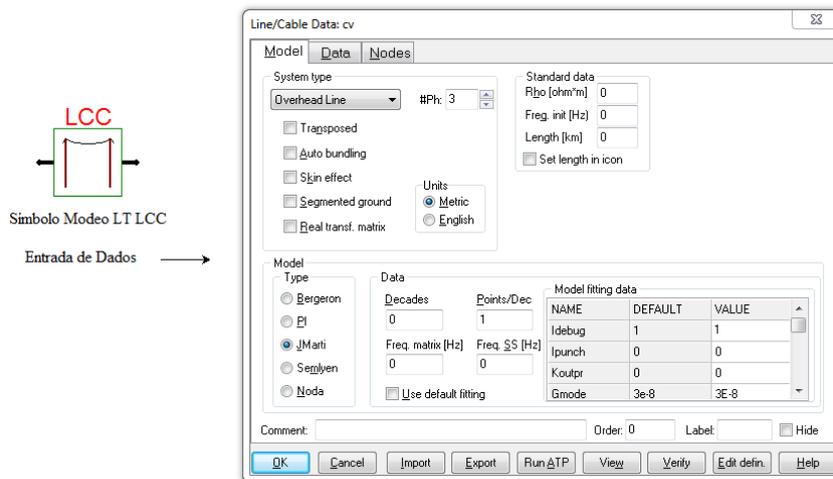


Figura 24 Símbolo e janela de parametrização no ATPDraw do modelo de LT tipo LCC.

#### 4.2.1.5 Carga Elétrica

Para representação das cargas conectadas no final da LT, foi adotado o modelo RLCY3, que tem valores de impedâncias independentes em cada uma das fases. Neste modelo as impedâncias estão conectadas em estrela e seu símbolo e janela de parametrização são mostrados na Figura 25.

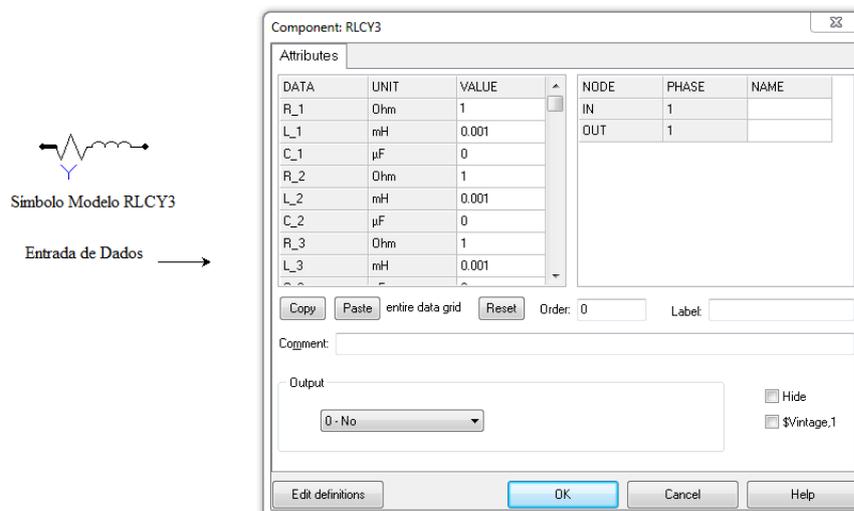


Figura 25 Símbolo e janela de parametrização no ATPDraw do modelo RLCY3.

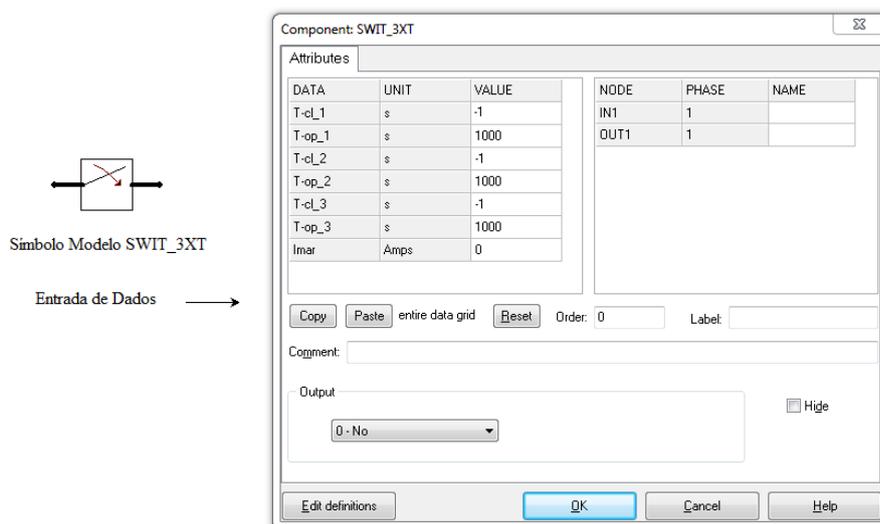
A carga indutiva conectada no final da LT foi selecionada segundo a potência nominal dos TDPs utilizados em cada simulação. Cada transformador foi carregado com uma porcentagem da carga nominal e para cada aumento de carga foi avaliado o desempenho da metodologia proposta. A consideração da variação da carga conectada ao TDP foi necessária objetivando representar o que ocorre em sistemas elétricos reais. Vale salientar também que o Fator de Potência (FP) da carga foi alterado em cada simulação objetivando verificar a sua influência no desempenho da metodologia de proteção. A Tabela 4 apresenta os valores de carga para cada um dos transformadores testados considerando um fator de carga<sup>10</sup> de 0,9 para os três TDP.

**Tabela 4** Cargas conectadas no final da LT utilizadas nas simulações efetuadas.

Denominação	Carga Nominal [MVA]	Impedância [Ohm]	FP Nominal	Conexão
C1 (TDP1)	27	705,2	0,92	Y
C2 (TDP2)	135	352,6	0,92	Y
C3 (TDP3)	135	352,6	0,92	Y

#### 4.2.1.6 Chaves Trifásicas de Tempo Controlado

As chaves S1, S2, S3 e S4 representadas na Figura 20 foram modelados como chaves tipo SWIT\_3XT que controlam independentemente, para cada fase, a operação do momento de fechamento e abertura do circuito. Na simulação de contingências, estas chaves submetem o TDP e a LT aos diferentes tipos de faltas: FFF (trifásica), FFT (bifásica–terra), e FT (fase–terra). Além disso, pela determinação do momento de fechamento controla-se também o ângulo de incidência de cada falta aplicada sobre o circuito de simulação. Sua simbologia e janela de parametrização são apresentadas na Figura 26.



**Figura 26** Símbolo e janela de parametrização no ATPDraw da chave trifásica SWIT\_3XT.

<sup>10</sup> O fator de carga é uma relação entre a carga média e a carga máxima do transformador em um determinado tempo.

### 4.3 Avaliação da Metodologia Proposta: Simulações Realizadas

Diversos casos de simulação foram realizados com o intuito de gerar uma quantidade suficiente e diversificada de dados, abrangendo uma ampla quantidade de condições de operação presentes em casos reais. Simulou-se uma série de situações operacionais e situações faltosas utilizando o *software* ATP/EMTP a fim de estudar e avaliar a maioria das combinações possíveis para os casos de interesse. Nas tabelas 5 a 13 são apresentadas as combinações de casos de simulação utilizados para a geração do conjunto de sinais diferenciais que representam as situações operacionais estudadas.

#### 4.3.1 Fenômenos Estudados

O algoritmo de proteção proposto opera com base na análise dos sinais de corrente diferencial trifásica geradas nas simulações realizadas sob o sistema elétrico representado na Figura 20. As simulações se concentram nas seguintes situações:

- Energização de transformador em vazio e com carga;
- Energização de transformador com presença de faltas internas;
- Energização de transformadores em paralelo (*Sympathetic Inrush* ou energização solidária);
- Faltas internas repentinas trifásicas entre os enrolamentos primário e secundário e a terra;
- Faltas internas repentinas (monofásicas, bifásicas e trifásicas);
- Faltas internas incipientes (monofásicas, bifásicas e trifásicas);
- Faltas externas ao transformador (monofásicas e trifásicas);
- Faltas internas aplicadas entre enrolamentos do transformador;
- Remoção de faltas externas;
- Rejeição de cargas;
- Saturação dos TCs nas três fases (A, B e C);
- Sobre-excitação de transformador.

Vale salientar que todos estes fenômenos foram testados para diferentes grupos de conexão.

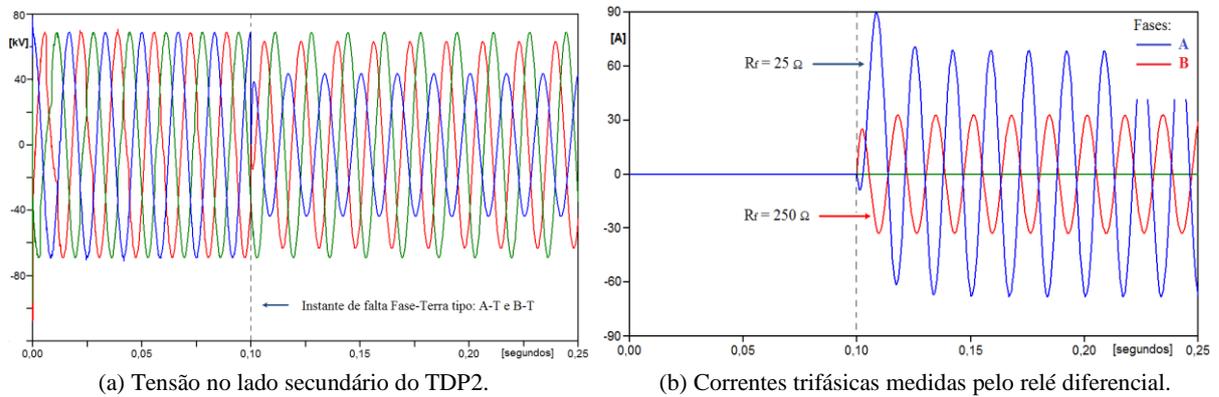
#### 4.3.2 Simulações de Faltas Internas no TDP

##### 4.3.2.1 Faltas Internas Repentinhas (FIR)

Todos os tipos de faltas internas como: Fase-Terra (FT), Fase-Fase (FF), Fase-Fase-Terra (FFT) e Trifásica (FFF) foram simuladas utilizando o modelo Híbrido de transformador disponível no *software* ATP/EMTP. Vale salientar que todas as faltas simuladas foram aplicadas em 100 % do enrolamento primário e/ou secundário, ou seja, nos terminais ou buchas do transformador. Além disso, se alterou o ângulo de incidência da falta considerando também variações na impedância da fonte de  $\pm 20$  % em relação aos valores nominais.

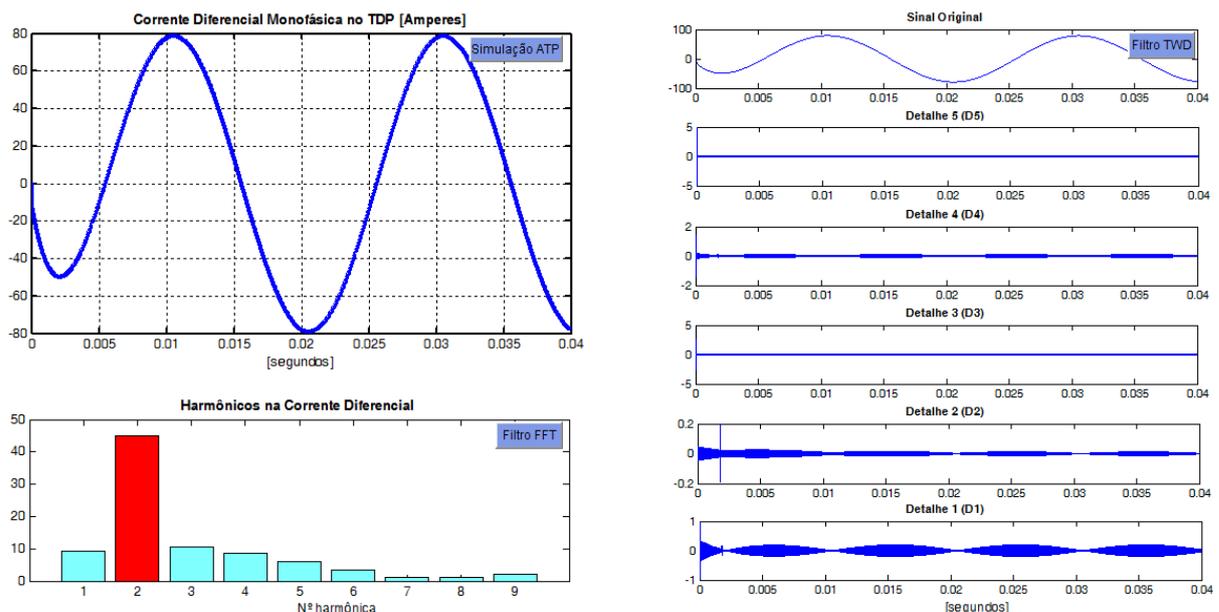
Nesta simulação, a chave de curto-circuito, S3 na Figura 20, conecta 100 % do enrolamento secundário do transformador de potência com a terra através de uma resistência de falta  $R_f$  variável. A Figura 27a ilustra as tensões no enrolamento secundário do transformador TPD2 (150 MVA) quando ocorre um curto-circuito interno entre as fases A, B e Terra. Observa-se uma queda de tensão nas fases A e B devido à corrente de curto-circuito no enrolamento do transformador. A Figura 27b, apresenta as correntes diferenciais trifásicas medidas no circuito diferencial para um curto-circuito entre as fases A-B e a Terra considerando uma resistência

de falta na fase A de  $25 \Omega$  e na fase B de  $250 \Omega$ . Nota-se a influência da resistência de falta  $R_f$  sob a amplitude máxima das correntes de falta nas fases A e B.



**Figura 27** Condição de FIR bifásica tipo A-B-T com resistências de falta de:  $R_{fA} = 25 \Omega$  e  $R_{fB} = 250 \Omega$ .

Na Figura 28 é apresentada a decomposição dos coeficientes Wavelet em 5 níveis de detalhe para a corrente de falta na fase A originada pela situação faltosa mostrada na Figura 27. Esta corrente de falta ultrapassa o limiar da corrente de ativação especificado no bloco 1 do algoritmo de proteção (35 amperes) e ativa o bloco 2 para discriminação do evento. Para conseguir caracterizar o tipo de distúrbio, no bloco 2 se calcula a Transformada Wavelet Discreta (TWD) sobre o sinal diferencial e a energia espectral dos coeficientes wavelet em cada um dos 5 níveis de detalhe. Cada nível de decomposição representa uma determinada faixa de frequências do sinal original e o nível de energia espectral de um determinado detalhe (faixa de frequência) será tanto maior quanto maior seja o número de coeficientes wavelet que estejam dentro desse detalhe. Assim, faltas internas podem ser caracterizadas pelo nível de energia espectral do primeiro detalhe (D1) dado que perante este tipo de eventos verificou-se que este nível de decomposição apresenta maiores níveis de energia espectral (maior quantidade de coeficientes wavelet em relação aos outros detalhes).



**Figura 28** Decomposição wavelet de um sinal diferencial correspondente a uma falta interna monofásica tipo  $F_{A-T}$  com  $R_{fA} = 20 \Omega$  em um TDP de 150 MVA.

Na Figura 28 observa-se também que, mesmo sendo uma falta interna ao TDP, o sinal de corrente diferencial é composto por uma segunda harmônica superior em amplitude à componente fundamental. Este comportamento da segunda harmônica indicaria, na metodologia de proteção convencional, que o evento gerador da corrente diferencial trata-se de uma energização do transformador e indicaria a não atuação do relé de sobrecorrente. Neste sentido, situações similares acontecem na prática e muitas faltas internas não são corretamente detectadas gerando problemas tanto para as concessionárias elétricas quanto para os engenheiros de proteção os quais enfrentam problemas de ajustes de relés de proteção. A Tabela 5 mostra a combinação de parâmetros utilizados para a elaboração do banco de dados relativo à simulação de faltas internas nos três TDPs avaliados individualmente. Neste caso, consideraram-se faltas: FT, FF, FFT, FFF e FFFT em ambos os lados do transformador. Dessa forma, os valores de carga combinaram-se aos valores de resistência de falta  $R_f$  e aos valores dos ângulos de inserção das faltas. A porcentagem de carga conectada ao transformador foi alterada em cada simulação entre 0 % e 150 % com incrementos de 50 %. Por outro lado, a variação do fator de potência (FP) da carga também foi considerada nas simulações sendo adotados valores de 0,68 até 0,98.

**Tabela 5** Casos testes de FIR sob o TDP (4.928 casos).

Tipo de Falta Interna			Ângulo de Início da Falta [°]	Nível de Carga [%]	FP Carga	$R_f$ [ $\Omega$ ]
FT	FF / FFT	FFF / FFFT				
A-T, B-T, C-T						0,01
A-B, A-C, B-C			0 $\rightarrow$ 90	0 $\rightarrow$ 150	0,68 $\rightarrow$ 0,98	25
A-B-T, A-C-T, B-C-T			( $\partial$ de 30)	( $\partial$ de 50)	( $\partial$ de 0,05)	100
A-B-C						500
A-B-C-T						

$\partial$  = incrementos

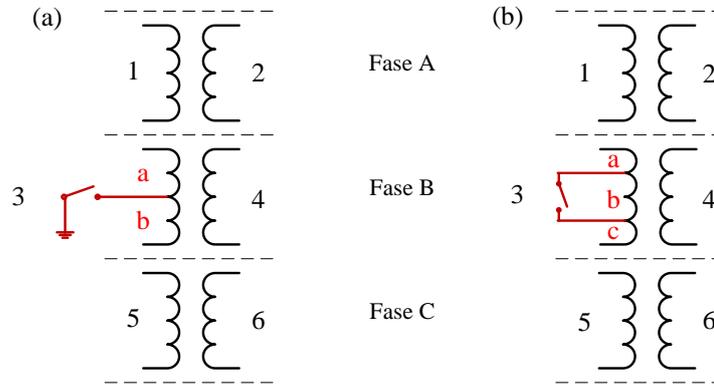
#### 4.3.2.2 Faltas Internas Incipientes (FII)

Como observado na revisão bibliográfica, dentre 70%-80% do número total de faltas em TDP são eventualmente rastreados através de falhas de isolamento entre espiras (KULKARNI; KHAPARDE, 2005). Este tipo de faltas é chamado “faltas incipientes”, pois começam a se manifestar como pequenos arcos elétricos entre espiras do enrolamento do transformador. Estes tipos de faltas devem-se à degradação do isolamento do TDP devido à sobre-elevação de temperatura, falhas elétricas e estresse mecânico gerado por faltas externas (BUTLER-PURRY; BAGRIYANIK, 2003). Se não são detectadas rapidamente, este tipo de faltas podem se tornar situações faltosas mais severas ou podem provocar arcos elétricos entre os enrolamentos e o tanque de expansão do TDP. Embora, o esquema de proteção diferencial tradicional seja capaz de detectar este tipo de faltas através de relés eletromecânicos, a sensibilidade global do sistema de proteção é reduzida drasticamente.

Para o estudo de faltas internas incipientes em transformadores, (BASTARD; BERTRAND; MEUNIER, 1994) sugere a modificação do modelo BCTRAN de transformadores disponível no ATP/EMTP. Normalmente, o modelo BCTRAN usa uma matriz de indutâncias 6x6 para representar o transformador, no entanto, perante uma condição de falta interna a matriz é ajustada a um tamanho de 7x7 para faltas do tipo enrolamento-terra. Vale salientar que, os

efeitos das componentes de alta frequência que podem acontecer durante as faltas incipientes não estão incluídos neste modelo.

No modelo BCTRAN o transformador é considerado como braços R-L acoplados mutuamente, como mostrado na Figura 29, onde os enrolamentos são divididos segundo o tipo de falta a ser simulada. Assim, por exemplo, o enrolamento 3 é dividido em duas partes quando a falta é do tipo espira-terra ou em três partes quando a falta é do tipo espira-espira.



**Figura 29** Modelagem do transformador como braços R-L mutuamente acoplados. (a) falta espira-terra, (b) falta espira-espira.

Baseado nos dados de ensaios de excitação e curto-circuito este modelo calcula a matriz de resistências  $[R]$  e de impedâncias  $[L]$  do transformador. No caso de um transformador trifásico com dois enrolamentos estas matrizes são de ordem 6 como mostrado nas equações 4.1 e 4.2:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Assim, neste trabalho foram simuladas faltas do tipo espira-terra no enrolamento 3, Figura 29a, para o qual as matrizes acima são modificadas. Neste tipo de faltas, novos valores de resistências e indutâncias devem ser considerados nas matrizes  $[R]$  e  $[L]$ , ficando as mesmas como:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{1a} & M_{1b} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & M_{2a} & M_{2b} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{a1} & M_{a2} & L_a & M_{ab} & M_{a4} & M_{a5} & M_{a6} \\ M_{b1} & M_{b2} & M_{ba} & L_b & M_{b4} & M_{b5} & M_{b6} \\ M_{41} & M_{42} & M_{4a} & M_{4b} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{5a} & M_{5b} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{6a} & M_{6b} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Na matriz representada na equação (4.3),  $R_a$  e  $R_b$  resultam da divisão do enrolamento 3 do transformador em duas partes devido a uma falta tipo espira-terra. Esta divisão do enrolamento gera também novos valores de indutâncias próprias e mútuas representadas na matriz de indutâncias na equação (4.4).

Para cálculo dos novos parâmetros das matrizes  $[R]$  e  $[L]$  relacionados com a divisão do enrolamento faltoso, considerações tais como: regra de proporcionalidade, fator de dispersão entre enrolamentos e percentagem total de espiras faltosas devem ser considerados segundo recomendações de (KEZUNOVIC; YONG, 2000; BASTARD; BERTRAND; MEUNIER, 1994).

Neste trabalho foram simuladas faltas incipientes do tipo espira-terra nas três fases tanto no enrolamento primário quanto no secundário dos TDPs sendo apresentados na Tabela 6 um resumo dos casos estudados. Neste sentido, todas as faltas foram consideradas como sendo sólidas, ou seja, sem resistência de falta no ponto de curto-circuito dado que as matrizes detalhadas nas equações (4.3) e (4.4) já consideram as resistências e impedâncias geradas no TDP.

**Tabela 6** Casos testes de FII no TDP (1.344 casos).

Tipo de Falta Simulada	Porcentagem de Espiras Curto-circuitadas				Nível de Carga [%]	FP da Carga	Enrolamento Faltoso
A-T, B-T, C-T	0,5	2,5	5	10	0 → 150	0,68 → 0,98	Primário e Secundário
A-B, A-C, B-C	0,5	2,5	5	10	( $\partial$ de 50)	( $\partial$ de 0,05)	Separadamente

$\partial$  = incrementos

### 4.3.2.3 Faltas Entre Enrolamento Primário e Secundário

Em virtude do projeto confiável da isolação do transformador, o enrolamento de Baixa Tensão (BT) é colocado perto do núcleo do transformador. Acima deste enrolamento se coloca o enrolamento de Alta Tensão (AT) objetivando que fique mais longe do núcleo. O envelhecimento gradual e o estresse térmico e elétrico originados por curto-circuitos no sistema elétrico reduz a capacidade mecânica e elétrica dos enrolamentos do transformador. Isto pode provocar deterioro no isolamento do enrolamento e subsequentemente gerar dano no bobinado (KULKARNI; KHAPARDE, 2005). Neste sentido, simulou-se neste trabalho faltas

internas entre o enrolamento primário e secundário considerando que as faltas acontecem em 100 % do enrolamento, ou seja, sem levar em conta as faltas que puderem ocorrer, por exemplo, na metade dos enrolamentos de baixa e alta tensão. Esta simplificação foi necessária dado que não se dispõe de ferramentas adequadas para calcular as impedâncias próprias e mútuas, geradas por faltas incipientes entre o bobinado primário e secundário do transformador. Assim, as matrizes apresentadas nas equações (4.3) e (4.4) não são utilizadas nesta simulação. As faltas simuladas foram do tipo FT com ângulos de inserção de falta variáveis. A Tabela 7 mostra, de forma sucinta, a combinação de parâmetros utilizados na simulação dos casos de faltas entre o enrolamento primário e secundário do transformador, onde vários casos foram simulados. Os valores de FP da carga do sistema foram combinados aos valores dos ângulos de inserção das faltas.

**Tabela 7** Casos testes de faltas entre bobinados primários e secundários dos TDPs (560 casos).

Tipo de Falta Simulada	Ângulo Inserção da Falta	FP da Carga	Nível de Carga [%]	Enrolamentos Faltosos
A-T, B-T, C-T	0° → 90°	0,68 → 0,98	0 → 150	Primário a Secundário
FFF, FFF-T	( $\hat{\partial}$ de 30°)	( $\hat{\partial}$ de 0,5)	( $\hat{\partial}$ de 50)	

$\hat{\partial}$  = incrementos

### 4.3.3 Simulação de Condições Não Faltosas (Transitórias)

Vários tipos de faltas externas ou distúrbios transitórios foram simulados neste trabalho objetivando avaliar o desempenho do algoritmo proposto perante situações não faltosas<sup>11</sup>. Estas condições de operação acontecem continuamente em sistemas reais e as mesmas são apresentadas a seguir.

#### 4.3.3.1 Energização do Transformador – Corrente de *Inrush*

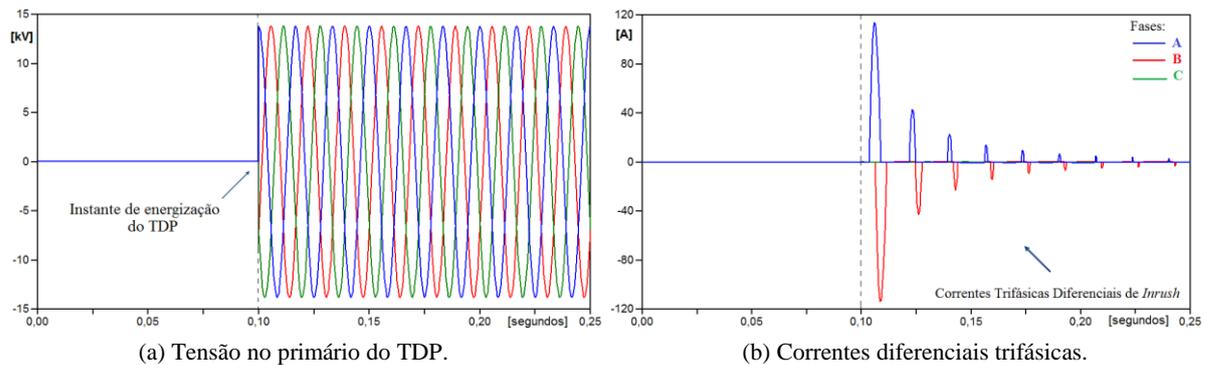
Como apresentado no Capítulo 2, em um SEP a energização de um TDP pode gerar correntes de magnetização chamadas como “correntes de *inrush*”. Embora a magnitude desta corrente seja dentre 1 – 2 % acima do valor da corrente nominal em regime permanente, a mesma pode tornar-se muito elevada em relação à corrente nominal quando o TDP é energizado. Por causa da lenta atenuação deste transitório, seu efeito pode persistir durante vários segundos antes que seja atingido o regime permanente (OLIVEIRA et al., 2012b).

Quando um transformador é energizado, o fluxo magnético de estado estacionário é diferente do fluxo magnético instantâneo o que ocasiona correntes de pico conhecidas como fluxos de magnetização *inrush* no transformador. Quando um transformador é energizado e posteriormente desconectado da fonte de tensão, existe a possibilidade de que os valores de fluxo magnético não sejam absolutamente zero existindo assim o que se conhece como fluxo residual. No estudo de energização este fluxo residual chama-se “*inrush* inicial” o qual considera o magnetismo residual. O mesmo não foi considerado neste estudo.

Neste trabalho o fenômeno *inrush* foi simulado considerando uma variação de  $\pm 20$  % na impedância da fonte, dado que esta impedância apresenta influência sobre o amortecimento das correntes de *inrush*. Além disso, alterou-se também o ângulo de chaveamento do interruptor de energização, adotando valores de 0° até  $\pm 90^\circ$  com incrementos de 30°. Por outro lado, várias condições de carga foram avaliadas objetivando verificar a sua influencia sobre os picos da corrente de *inrush*. Assim, variações de carga desde zero até 150% da carga nominal foram simuladas considerando incrementos de 50 %.

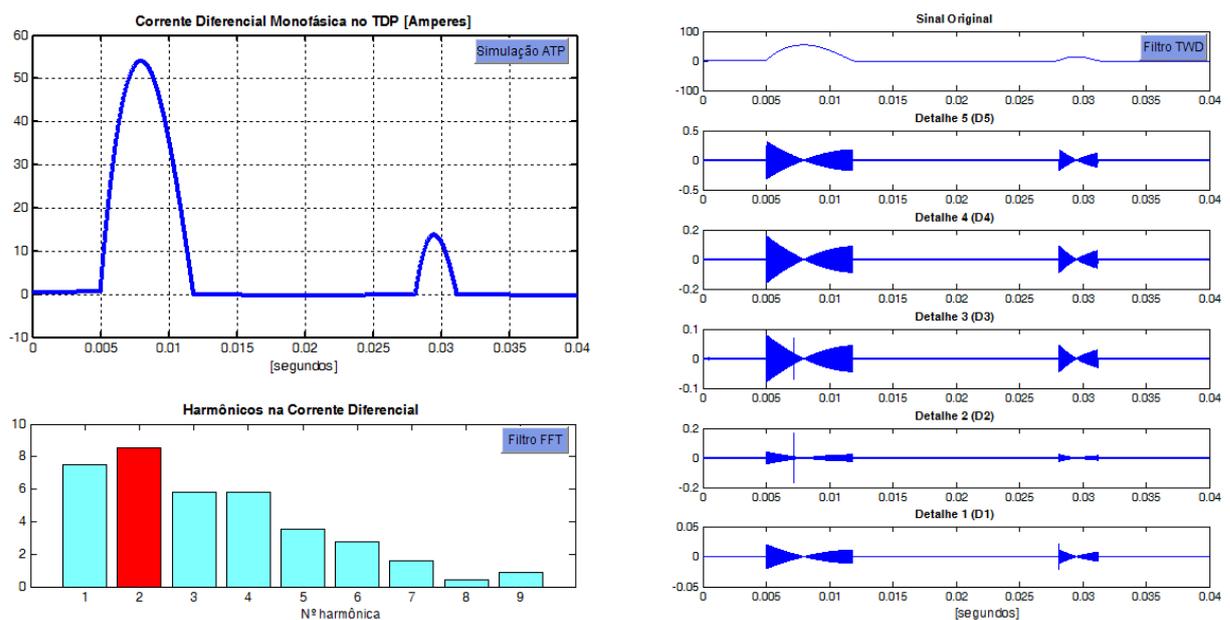
<sup>11</sup> São eventos que acontecem no TDP mais não são consideradas faltosas e sim eventos transitórios.

A Figura 30a ilustra o comportamento das tensões no primário do TDP1 (30 MVA, 13,8/138 kV) quando uma energização trifásica acontece em 0,1 segundos de iniciada a simulação sobre o circuito ilustrado na Figura 20. Nesta situação, o procedimento de manobra consiste em fechar o interruptor S1 do lado primário do TDP com o lado secundário em aberto, sem carga. A Figura 30b apresenta as correntes diferenciais medidas pelo relé de proteção, nas quais se observa a magnitude atingida por estas correntes. Essa magnitude fará com que a corrente de ativação do algoritmo de proteção ultrapasse um determinado valor limiar e ative o bloco 2 do algoritmo de proteção proposto.



**Figura 30** Energização do TDP1 em 0,1 segundos nas fases A, B e C.

A Figura 31 ilustra a decomposição wavelet de um sinal de corrente de *inrush* para um TDP de 30 MVA energizado com um ângulo de chaveamento de  $60^\circ$ . Nesta Figura pode-se observar que perante picos de corrente, maior quantidade de coeficientes de detalhe são visualizados, ou seja, existem regiões em uma mesma faixa de frequências onde existe maior concentração de energia espectral. Esta característica dos coeficientes de detalhe somente acontece para casos de energização e sua quantificação permite a correta caracterização da corrente de *inrush*. Comparando os coeficientes de detalhes ilustrados na Figura 31 com os coeficientes da Figura 28, correspondentes a um caso de falta interna no TDP, pode-se observar diferenças na concentração/quantidade de energia espectral gerada pelos coeficientes para cada caso, o qual permite a discriminação de cada evento em forma direta.



**Figura 31** Decomposição wavelet de um sinal diferencial correspondente a uma energização na fase A do transformador de 30 MVA.

A Tabela 8 apresenta a combinação de parâmetros utilizados na simulação dos casos de energização para cada TDP avaliado neste trabalho. O instante de energização, as fases energizadas, a impedância da fonte e o nível de carga no final da LT são os parâmetros que foram alterados objetivando a avaliação do algoritmo proposto.

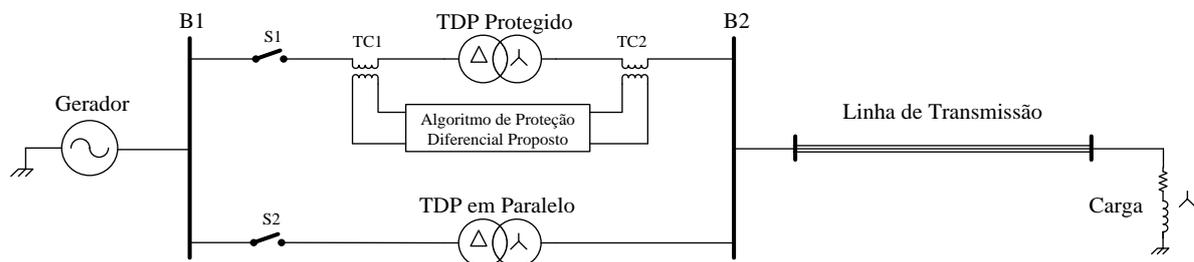
**Tabela 8** Casos testes para energização dos TDPs (2.016 casos).

Tensão no Primário [kV]	Instante de Energização	Fases Energizadas	Impedância da Fonte	Nível de Carga
13,8	$0^\circ \rightarrow 90^\circ$	A, B, C,	100% $\pm$ 20%	0 $\rightarrow$ 150% ( $\partial$ de 50%)
	$0^\circ \rightarrow -90^\circ$	A-B, A-C, B-C,		
	( $\partial$ de $30^\circ$ )	A-B-C		
230	$0^\circ \rightarrow 90^\circ$	A, B, C,	100% $\pm$ 20%	0 $\rightarrow$ 150% ( $\partial$ de 50%)
	$0^\circ \rightarrow -90^\circ$	A-B, A-C, B-C,		
	( $\partial$ de $30^\circ$ )	A-B-C		
230	$0^\circ \rightarrow 90^\circ$	A, B, C,	100% $\pm$ 20%	0 $\rightarrow$ 150% ( $\partial$ de 50%)
	$0^\circ \rightarrow -90^\circ$	A-B, A-C, B-C,		
	( $\partial$ de $30^\circ$ )	A-B-C		

$\partial$  = incrementos

#### 4.3.3.2 Energização de Transformadores em Paralelo – Energização Solidária

A energização de transformadores em paralelo é uma prática muito necessária na operação dos SEP, principalmente no fornecimento de energia a grandes cargas. Durante esta operação, acontece um fenômeno similar ao de energização de TDP que operam sozinhos. Como apresentado no início, em um SEP a energização de um TDP pode gerar correntes de magnetização chamadas correntes de *inrush*. A componente DC da corrente de *inrush* pode provocar a saturação do transformador energizado e produzir um fluxo de corrente de *inrush* para o transformador em serviço (HOROWITZ; PHADKE, 2008). A Figura 32 ilustra a situação simulada neste trabalho onde o fenômeno conhecido como “*Sympathetic Inrush*” ou “energização solidária” é estudado sobre o TDP protegido (em serviço), quando um transformador conectado em paralelo é energizado através da chave S2.



**Figura 32** Circuito para simulação de energização solidária (*Sympathetic Inrush*).

Neste trabalho este fenômeno foi simulado considerando diferentes ângulos de energização e diferentes condições de carga como apresentado na Tabela 9.

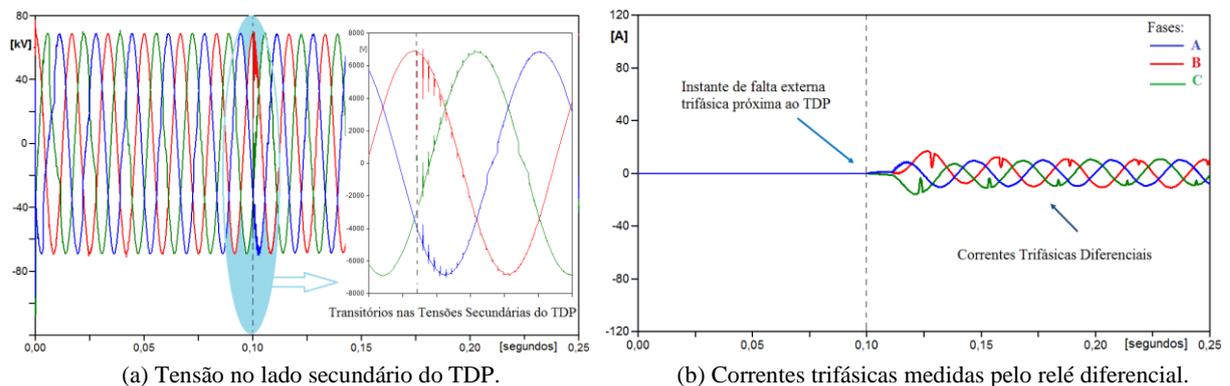
**Tabela 9** Casos teste para energização de TDP em paralelo (288 casos).

Tensão Primário [kV]	Instante de Energização	Fases Energizadas	Impedância da Fonte	Nível de Carga
13,8	$0^\circ \rightarrow 90^\circ$	A-B-C	100% $\pm 20\%$	0 $\rightarrow$ 150% ( $\partial$ de 50%)
230	$0^\circ \rightarrow -90^\circ$			
	( $\partial$ de $30^\circ$ )			

$\partial$  = incrementos

#### 4.3.3.3 Falta Externa ao Transformador

Diferentes tipos de faltas externas foram simulados tais como: FT, FF, FFT e FFF todas com diferentes ângulos de incidência de falta e diferentes pontos de aplicação da falta ao longo da linha de transmissão. A Figura 33a ilustra o comportamento das tensões no lado secundário do TDP3 (150 MVA, 230/69 kV) quando uma falta FFF acontece a uma distância de 0,5 km do TDP. Observam-se transitórios de curta duração gerados nas tensões secundárias do TDP quando da ocorrência de uma falta externa. Na Figura 33b pode-se notar a magnitude das correntes trifásicas no relé diferencial.



**Figura 33** Condição de falta externa trifásica no lado secundário do TDP de 150 MVA, Y- $\Delta$  com  $R_f = 0,1 \Omega$ .

A Tabela 10 apresenta os parâmetros que foram modificados para simulação de diferentes casos de faltas externas ao TDP. Da mesma forma que em simulações anteriores, neste caso se modificou o nível de carga, a resistência de falta e o ângulo de inserção da mesma.

**Tabela 10** Casos testes de faltas externas ao transformador (1.728 casos).

Instante da Falta [seg.]	Tipo de Falta Externa Simulada			Nível de Carga [%]	$R_f$ [ $\Omega$ ]	Distância da Falta [km]
	FT	FF / FFT	FFF / FFFT			
	A-T, B-T, C-T					
0,1 $\rightarrow$ 0,5 ( $\partial$ de 0,08)		A-B, A-C, B-C A-B-T, A-C-T, B-C-T	A-B-C A-B-C-T	0 $\rightarrow$ 150 ( $\partial$ de 50)	0,01 25 100 500	1 $\rightarrow$ 100 ( $\partial$ de 50)

$\partial$  = incrementos

#### 4.3.3.4 Sobre-Excitação de Transformadores

A condição de Sobre-Excitação (SE) foi simulada com diferentes valores de sobre-tensão mudando a tensão no primário dos TDPs desde 110 % até 150 % do valor nominal com incrementos de 10 %. Além disso, a frequência fundamental (60 Hz) foi alterada em  $\pm 5$  %. Também nesta simulação a carga foi alterada desde o valor zero até a carga nominal e considerando uma variação de  $\pm 20$  % na impedância da fonte de tensão (gerador síncrono). A Tabela 11 apresenta os casos simulados para esta condição de operação do transformador.

**Tabela 11** Casos teste de sobre-excitação de transformadores (180 casos).

Sobre-tensão [%]	Frequência [Hz]	Impedância da Fonte	Nível de Carga
110 $\rightarrow$ 150 ( $\hat{\partial}$ de 10)	60Hz $\pm 5\%$	100% $\pm 20\%$	0 $\rightarrow$ 150 ( $\hat{\partial}$ de 50)

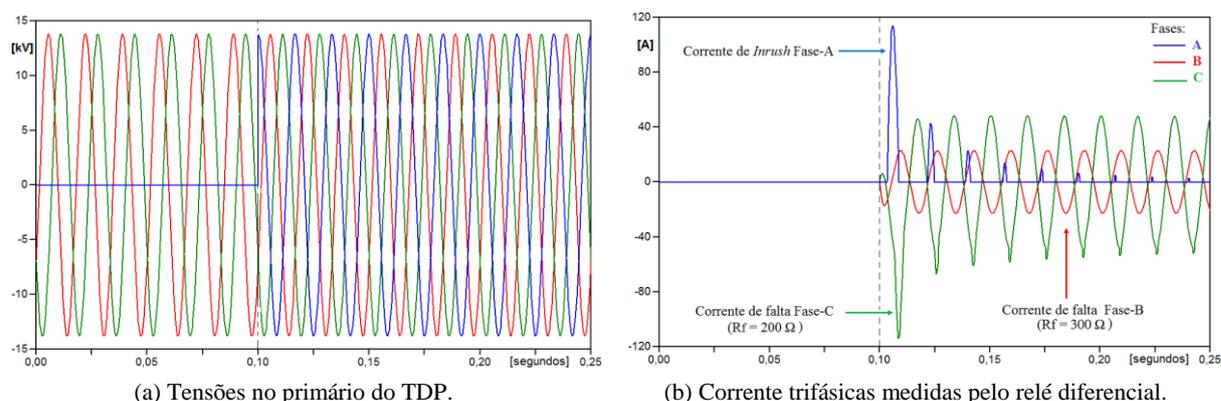
$\hat{\partial}$  = incrementos

#### 4.3.4 Simulação de Outros Eventos

Objetivando avaliar o desempenho do algoritmo de proteção perante situações como: possível acontecimento simultâneo de situações transitórias junto a situações faltosas ou condições de saturação de TCs, serão apresentados a seguir os testes efetuados neste sentido para verificar a capacidade do algoritmo proposto em identificar determinadas situações.

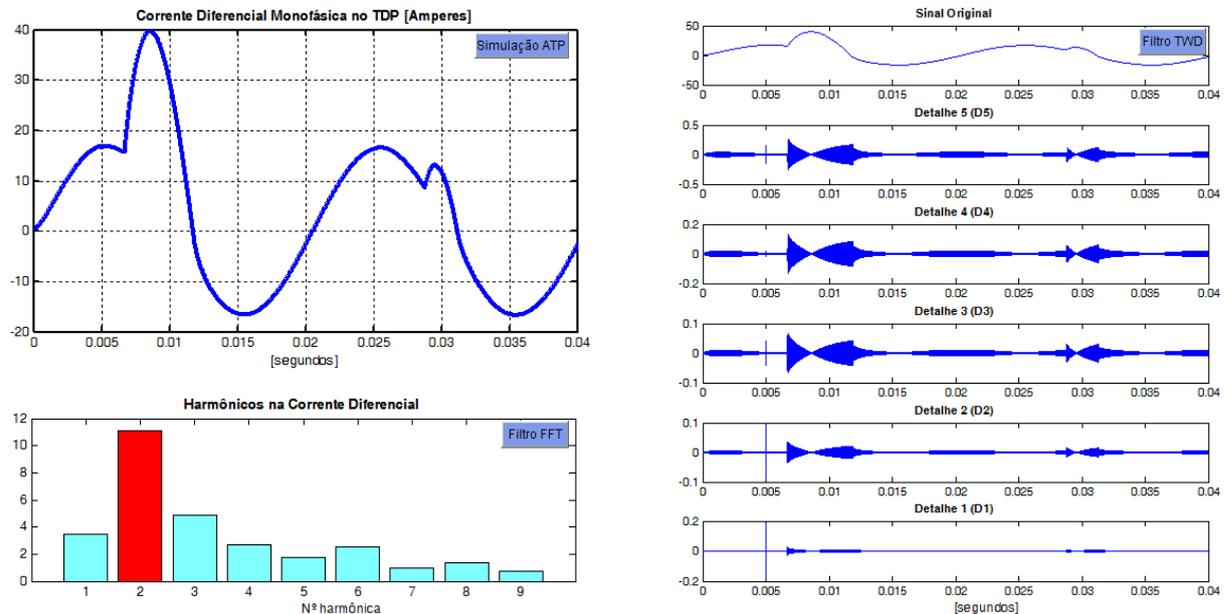
##### 4.3.4.1 Energização de Transformadores com Presença de Falta Interna

Em situações reais pode acontecer que um transformador seja energizado no momento exato que uma falta interna, incipiente ou não, esteja acontecendo. Perante esta situação, o algoritmo de proteção deve discriminar eficientemente ambos os eventos para evitar que o relé interprete incorretamente o sinal de corrente diferencial. Na Figura 34a, se apresenta o comportamento das tensões primárias do transformador TDP1 quando da ocorrência de uma falta FT, entre as fases B, C e a terra, junto a uma condição de energização na fase A acontecendo ambas em 0,1 segundos de simulação. Na Figura 34b, se observa as magnitudes, quase iguais no primeiro instante de energização, das correntes diferenciais produzidas pela falta interna (fases B e C) e pela energização do transformador (fase A). Note-se que a corrente diferencial *inrush* na fase A atinge um valor superior ao valor atingido pela corrente diferencial de falta interna na fase B. Isso mostra a importância da consideração das correntes *inrush* no esquema de proteção diferencial. A simulação apresentada foi efetuada considerando resistências de falta de 200  $\Omega$  (fase C) e 300  $\Omega$  (fase B).



**Figura 34** Energização do transformador de 30 MVA em 0,1 segundos com presença de falta interna.

A Figura 35 apresenta a decomposição wavelet em componentes de detalhe para uma situação de energização do transformador de 30 MVA simultaneamente a uma situação de falta interna, ambos para a fase B. Salienta-se que a concentração de energia espectral dos coeficientes de detalhe continua sendo maior em regiões onde os picos de corrente de *inrush* acontecem, entanto que, os coeficientes de detalhe para a situação de falta interna apresentam um comportamento diferente estando distribuídos ao longo de todo o tempo de simulação.



**Figura 35** Decomposição wavelet de um sinal diferencial correspondente à energização na fase B de um TDP de 30 MVA simultaneamente à ocorrência de uma falta interna na mesma fase.

Na Tabela 12 se apresentam os casos simulados para energização dos transformadores com presença de falta interna. Diferentes instantes de energização junto a diferentes situações de falta foram testados.

**Tabela 12** Casos teste para energização de TDP junto a falta interna (3.360 casos).

Tensão no Primário	Instante de Energização	Fases Energizadas	Impedância da Fonte	Tipos de Falhas	Nível de Carga
13,8 (TDP1)	0° → 90° 0° → -90° (∂ de 30°)	A, B, C, A-B, A-C, B-C, A-B-C	100% ±20%	FT, FF, FFT, FFF, FFFT	0 → 150 (∂ de 50)
230 (TDP2)	0° → 90° 0° → -90° (∂ de 30°)	A, B, C, A-B, A-C, B-C, A-B-C	100% ±20%	FT, FF, FFT, FFF, FFFT	0 → 150 (∂ de 50)
230 (TDP3)	0° → 90° 0° → -90° (∂ de 30°)	A, B, C, A-B, A-C, B-C, A-B-C	100% ±20%	FT, FF, FFT, FFF, FFFT	0 → 150 (∂ de 50)

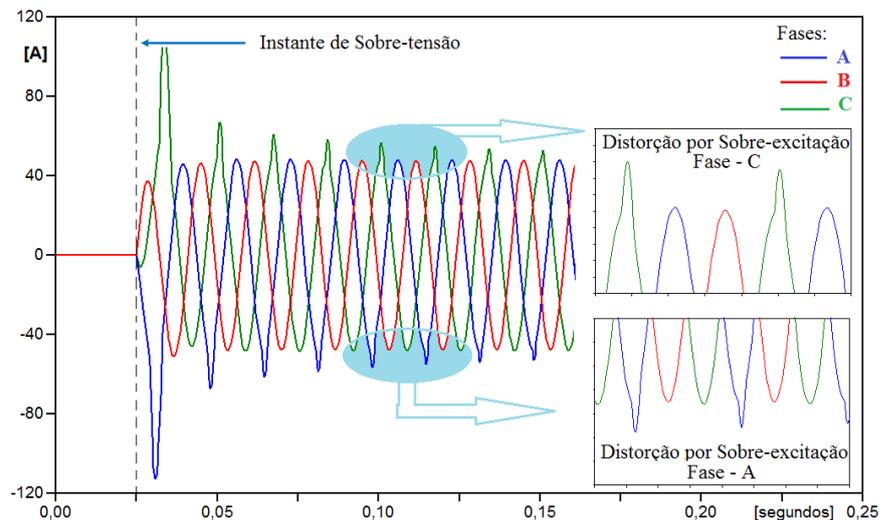
∂ = incrementos

#### 4.3.4.2 Sobre-excitação de TDP com Presença de Saturação de TCs

A saturação de TCs é um fenômeno não desejado na prática dado que gera uma deformação do sinal secundário dos TCs. Essa deformação do sinal secundário deve-se principalmente à saturação do circuito magnético dos TCs devido, por exemplo, a faltas próximas ao ponto de

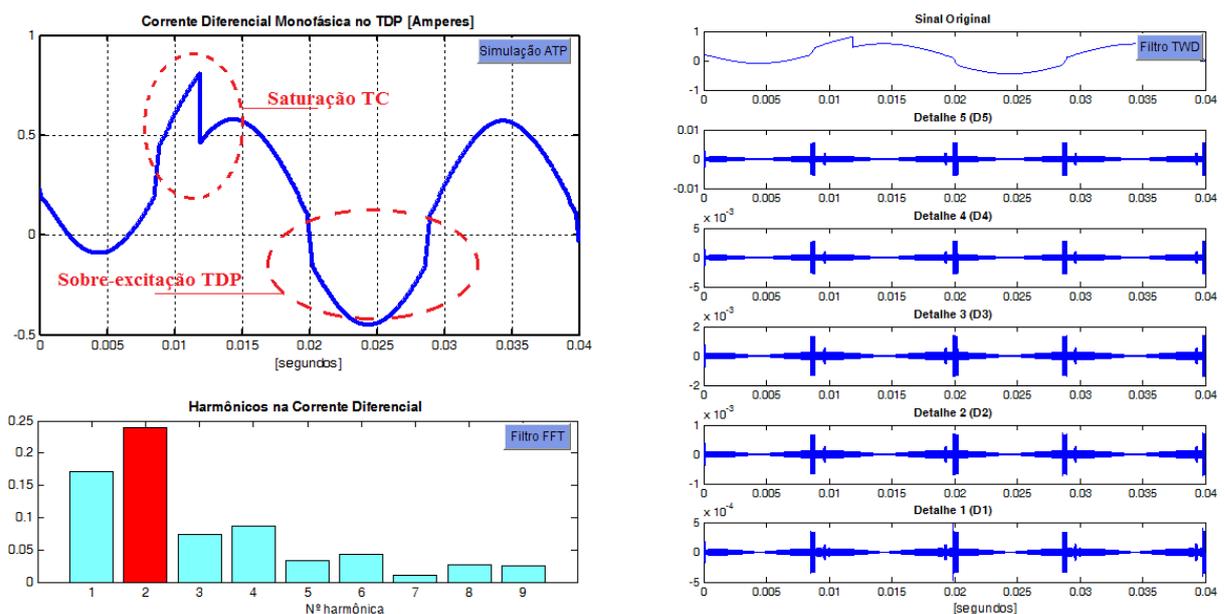
instalação dos mesmos. Essa corrente secundária “saturada” faz com que apareçam pequenas correntes no circuito de proteção diferencial as quais podem gerar a operação incorreta do relé de proteção.

A Figura 36 apresenta o comportamento das correntes diferenciais trifásicas quando da ocorrência de uma sobre-tensão de 120 % (em 0,025 segundos) sob o enrolamento primário do TDP de 30 MVA, 13,8/138 kV. Podem-se observar distorções nas correntes diferenciais das fases A e C as quais são apresentadas em forma ampliada.



**Figura 36** Correntes diferenciais trifásicas geradas por sobre-tensão de 120 % em um TDP de 30 MVA.

Por outro lado, a Figura 37 apresenta a corrente diferencial gerada no circuito do relé de proteção quando acontece a sobre-excitação no TDP1 junto à saturação de TCs. Deve-se destacar que a corrente diferencial sofre uma queda brusca no seu comportamento devido à saturação do TC conectado na fase mostrada na figura (fase A). Perante esta situação operacional, o algoritmo de proteção proposto mostrou-se eficiente na discriminação do evento de sobre-excitação e não foi afetado pela saturação do TC.



**Figura 37** Decomposição wavelet de um sinal diferencial correspondente à saturação de TCs simultaneamente à ocorrência de sobre-excitação do TDP de 30 MVA.

A Tabela 13 apresenta os casos estudados para verificar a sensibilidade do algoritmo proposto à saturação dos TCs conectados no circuito de proteção diferencial.

**Tabela 13** Casos teste de sobre-excitação de TDP junto a saturação de TCs (360 casos).

Sobre-tensão [%]	Frequência [Hz]	Impedância Fonte	Nível de Carga	TCs Saturados
110 → 150 ( $\partial$ de 10)	60 Hz $\pm$ 5%	100 % $\pm$ 20 %	0 → 150 ( $\partial$ de 50)	Primário e Secundário do TDP

$\partial$  = incrementos

## 4.4 Avaliação da Metodologia Proposta: Resultados Obtidos

### 4.4.1 Quantificação do Desempenho do Algoritmo

O algoritmo de proteção diferencial de transformadores proposto neste trabalho foi construído em ambiente MATLAB® e testado utilizando um banco de dados de sinais diferenciais elaborado segundo as situações faltosas e não faltosas apresentadas na seção anterior as quais foram geradas a partir do sistema elétrico da Figura 20 modelado no ATP/EMTP. Assim, o desempenho do algoritmo foi avaliado para diferentes situações de falta interna, falta externa (na LT) e distúrbios transitórios externos ao TDP com variação dos parâmetros do sistema. A eficiência da metodologia para cada situação testada foi calculada como:

$$\varepsilon = \frac{\text{Número de discriminações corretas}}{\text{Número total de casos testados}} \times 100\% \quad (4.5)$$

Nesta seção, a detecção correta de faltas e/ou distúrbios transitórios efetuados pelo algoritmo é denotado nas tabelas seguintes como “OC” e as discriminações incorretas do algoritmo são denotadas como “OI”. Os resultados obtidos nos testes serão apresentados em função dos seguintes parâmetros:

- variação da resistência de falta ( $R_f$ ),
- variação da carga conectada no final da LT,
- variação do fator de potência (FP) da carga conectada na LT,
- variação do instante de energização do TDP,
- variação da função wavelet (wavelet mãe).

Nas tabelas seguintes a primeira coluna apresenta os tipos de distúrbios analisados pelo algoritmo de proteção. Na segunda coluna denotam-se os valores correspondentes ao número total de casos utilizados em cada teste efetuado. Tais casos envolvem dados com e sem a presença de saturação dos TCs. Nas outras colunas apresentam-se a quantidade de acertos e erros atingidos pelo algoritmo junto ao valor percentual da eficiência ( $\varepsilon$ ) para cada evento analisando.

### 4.4.2 Desempenho do Algoritmo Perante Variação da Resistência de Falta

Na Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17 apresentam-se os resultados do desempenho obtido pelo algoritmo de proteção proposto para diferentes valores de resistência de falta ( $R_f$ ). Nas simulações efetuadas se considerou a carga conectada na LT como sendo a carga nominal, segundo a potência de cada TDP testado. Por outro lado, o fator de potência das cargas foi considerado como fixo no valor de 0,92.

**Tabela 14** Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP e diferentes situações faltosas.

<b>Resistência de Falta Considerada na Análise: <math>R_f = 0,01 \Omega</math></b>										
Condição Operacional	N° de Casos	TDP 30 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $Y - Y$ )		
		OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]
Faltas Internas Repentinhas	1.232	1.217	15	98,78	1.222	10	99,18	1.222	10	99,18
Faltas Externas (na LT)	396	396	0	100	396	0	100	396	0	100
Energização com Falta Interna	3.360	3.320	40	98,80	3.330	20	99,10	3.330	20	99,10
Energização com Falta Externa	640	600	40	93,75	605	35	94,53	605	35	94,53
Total por TDP	5.628	5.533	95		5.553	65		5.553	65	
Eficiência Global				98,31			98,66			98,66

**Tabela 15** Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP e diferentes situações faltosas.

<b>Resistência de Falta Considerada na Análise: <math>R_f = 25 \Omega</math></b>										
Condição Operacional	N° de Casos	TDP 30 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $Y - Y$ )		
		OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]
Faltas Internas Repentinhas	1.232	1.217	15	98,78	1.222	10	99,18	1.222	10	99,18
Faltas Externas (na LT)	396	396	0	100	396	0	100	396	0	100
Energização com Falta Interna	3.360	3.320	40	98,80	3.330	20	99,10	3.330	20	99,10
Energização com Falta Externa	640	600	40	93,75	605	35	94,53	605	35	94,53
Total por TDP	5.628	5.533	95		5.553	65		5.553	65	
Eficiência Global				98,31			98,66			98,66

**Tabela 16** Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP e diferentes situações faltosas.

<b>Resistência de Falta Considerada na Análise: <math>R_f = 100 \Omega</math></b>										
Condição Operacional	N° de Casos	TDP 30 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $Y - Y$ )		
		OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]
Faltas Internas Repentinhas	1.232	1.150	82	93,34	1.180	52	95,77	1.180	52	95,77
Faltas Externas (na LT)	396	396	0	100	396	0	100	396	0	100
Energização com Falta Interna	3.360	3.150	210	93,75	3.221	139	95,86	3.221	139	95,86
Energização com Falta Externa	640	615	25	96,09	615	25	96,09	615	25	96,09
Total por TDP	5.628	5.311	317		5.412	216		5.412	216	
Eficiência Global				94,36			96,16			96,16

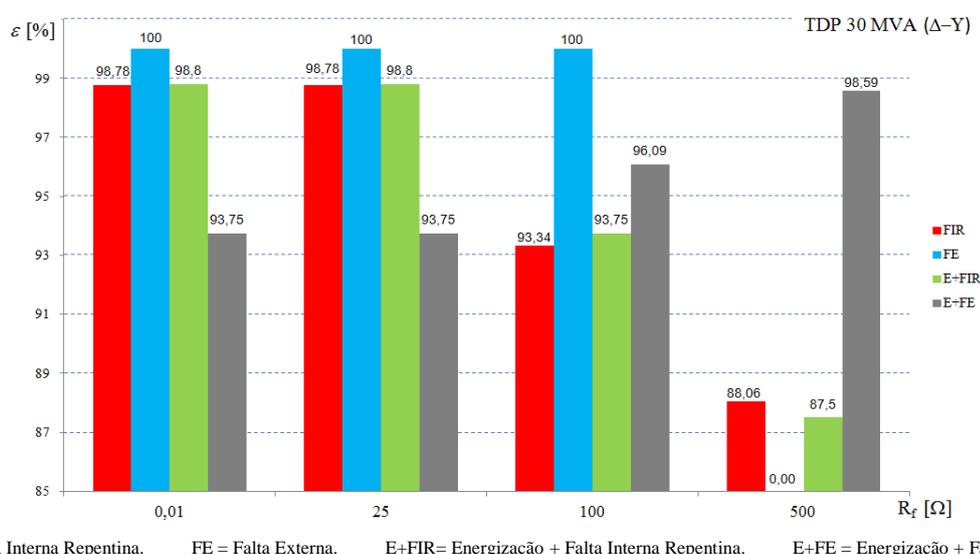
**Tabela 17** Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP e diferentes situações faltosas.

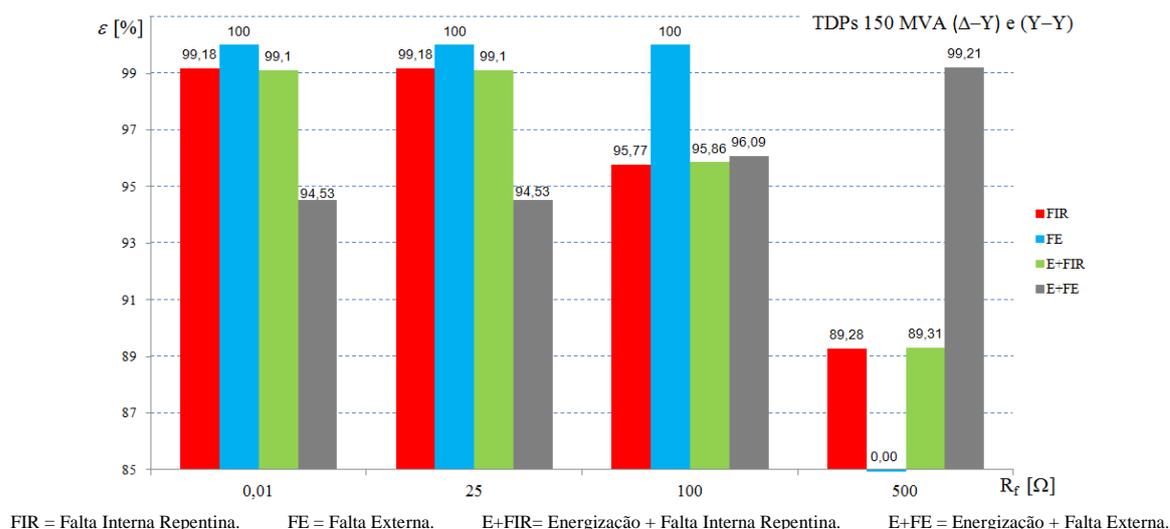
Resistência de Falta Considerada na Análise: $R_f = 500 \Omega$										
Condição Operacional	N° de Casos	TDP 30 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $Y - Y$ )		
		OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]
Faltas Internas Repentinhas	1.232	1.085	204	88,06	1.100	132	89,28	1.100	132	89,28
Faltas Externas (na LT)	396	---	---	---	---	---	---	---	---	(*)
Energização com Falta Interna	3.360	2.940	420	87,50	3.001	359	89,31	3.001	359	89,31
Energização com Falta Externa	640	631	9	98,59	635	5	99,21	635	5	99,21
Total por TDP	5.628	4.656	633		4.736	496		4.736	496	
Eficiência Global				88,99			90,51			90,51

Observação: --- (\*) sem valores de corrente diferencial.

As Figura 39 38 e 39 ilustram a variação de eficiência do algoritmo de proteção em função dos valores de  $R_f$  considerados nos testes. A eficiência da metodologia proposta se mantém acima de 87 % em todos os casos simulados sob o TDP de 30 MVA. Os valores de eficiência em ambos os TDP de 150 MVA, conexão  $\Delta - Y$  e  $Y - Y$ , são sempre iguais mostrando que o tipo de conexão não altera o resultado de discriminação da metodologia de proteção proposta. Vale salientar que os testes de Faltas Externas (FE) foram sempre identificados pelo algoritmo apresentando 100 % de eficiência. Por outro lado, não foi possível testar o algoritmo para FE com  $R_f = 500 \Omega$  devido à não identificação de correntes diferenciais no circuito de proteção.

A eficiência global do algoritmo de proteção, para todos os TDP avaliados, apresenta uma tendência decrescente à medida que aumenta a resistência de falta, no entanto, no caso de eventos simultâneos como Energização acontecendo junto a FE (E+FE) a eficiência aumenta. Acredita-se que este comportamento da eficiência deva-se ao fato de que as faltas de alta impedância poderiam produzir uma variação de energia espectral muito similar à variação produzida pela energização, o que facilita a discriminação do evento pelo algoritmo.

**Figura 38** Variação da precisão do algoritmo em função da resistência de falta para TDP de 30 MVA.



**Figura 39** Variação da precisão do algoritmo em função da resistência de falta para TDP de 150 MVA.

#### 4.4.3 Desempenho do Algoritmo Perante Variação do Nível de Carga no TDP

Nas tabelas a seguir apresentam-se os resultados do desempenho do algoritmo de proteção para diferentes condições de carga dos TDP. Assim, o nível de carga no final da LT foi alterado desde 0% até 150% segundo o tipo de TDP avaliado. Considerou-se um fator de carga de 0,9 para os três TDP, por tanto, as cargas nominais utilizadas em cada TDP foram: 27 MVA (TDP de 30 MVA) e 135 MVA (TDP de 150 MVA). Nas simulações efetuadas, manteve-se constante a resistência de falta em 0,01 Ω, objetivando a simulação de faltas sólidas. Vale salientar que o nível de carga na LT tem influência sob um maior número de eventos, se comparado com a variação da  $R_f$ .

**Tabela 18** Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP com nível de carga de 0 % (TDPs a vazio) e diferentes condições operacionais.

Nível de Carga Considerado na Análise: 0 %										
Condição Operacional	Nº de Casos	TDP 30 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $Y - Y$ )		
		OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]
Faltas Internas Repentinhas	1.232	1.217	15	98,78	1.222	10	99,18	1.222	10	99,18
Faltas Internas Incipientes	224 <sup>(†)</sup>	126	42	56,25	126	42	56,25	126	42	56,25
Faltas Externas (na LT)	396	396	0	100	396	0	100	396	0	100
Energização ( <i>Inrush</i> )	168	168	0	100	168	0	100	167	1	99,40
Energização com Falta Interna	3.360	3.320	40	98,80	3.330	30	99,10	3.330	30	99,10
Energização com Falta Externa	640	600	40	93,75	605	35	94,53	605	35	94,53
Energização Solidária	24	20	4	83,33	21	3	87,5	21	3	87,5
Sobre-excitação	45	43	2	95,55	41	4	91,11	41	4	91,11
Faltas entre Enrolamentos	140	125	15	89,28	122	18	87,14	122	18	87,14
Total por TDP	6.005	5.721	116		5.905	100		5.905	100	
Eficiência Global				95,27			98,33			98,33

†: Nas simulações de faltas incipientes em 0,5% do enrolamento dos TDPs não foram registradas correntes diferenciais no circuito de simulação impossibilitando a análise do distúrbio para este tipo de faltas.

**Tabela 19** Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP com nível de carga de 50 % e diferentes condições operacionais.

Nível de Carga Considerado na Análise: 50 %										
Condição Operacional	Nº de Casos	TDP 30 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $Y - Y$ )		
		OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]
Faltas Internas Repentinhas	1.232	1.217	15	98,78	1.222	10	99,18	1.222	10	99,18
Faltas Internas Incipientes	224	160	8	71,42	160	8	71,42	160	8	71,42
Faltas Externas (na LT)	396	390	6	98,48	391	5	98,73	391	5	98,73
Energização ( <i>Inrush</i> )	168	168	0	100	168	0	100	167	1	99,40
Energização com Falta Interna	3.360	3.320	40	98,80	3.328	32	99,04	3.328	32	99,04
Energização com Falta Externa	640	589	51	92,03	600	40	93,75	600	40	93,75
Energização Solidária	24	21	3	87,5	21	3	87,5	21	3	87,5
Sobre-excitação	45	40	5	88,88	41	4	91,11	41	4	91,11
Faltas entre Enrolamentos	140	128	12	91,42	125	15	89,28	125	15	89,28
Total por TDP	6.005	5.873	132		5.896	109		5.896	109	
Eficiência Global				97,80			98,18			98,18

**Tabela 20** Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP com nível de carga de 100 % e diferentes condições operacionais.

Nível de Carga Considerado na Análise: 100 %										
Condição Operacional	Nº de Casos	TDP 30 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $Y - Y$ )		
		OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]
Faltas Internas Repentinhas	1.232	1.217	15	98,78	1.222	10	99,18	1.222	10	99,18
Faltas Internas Incipientes	224	160	8	71,42	160	8	71,42	160	8	71,42
Faltas Externas (na LT)	396	385	11	97,22	340	56	85,85	340	56	85,85
Energização ( <i>Inrush</i> )	168	160	8	95,23	162	6	96,42	162	6	96,42
Energização com Falta Interna	3.360	3.050	310	90,70	3.100	260	92,26	3.100	260	92,26
Energização com Falta Externa	640	560	80	87,50	580	60	90,62	580	60	90,62
Energização Solidária	24	24	0	100	24	0	100	24	0	100
Sobre-excitação	45	38	7	84,44	38	7	84,44	38	7	84,44
Faltas entre Enrolamentos	140	135	5	96,42	135	5	96,42	135	5	96,42
Total por TDP	6.005	5.569	436		5.601	404		5.601	404	
Eficiência Global				92,73			93,27			93,27

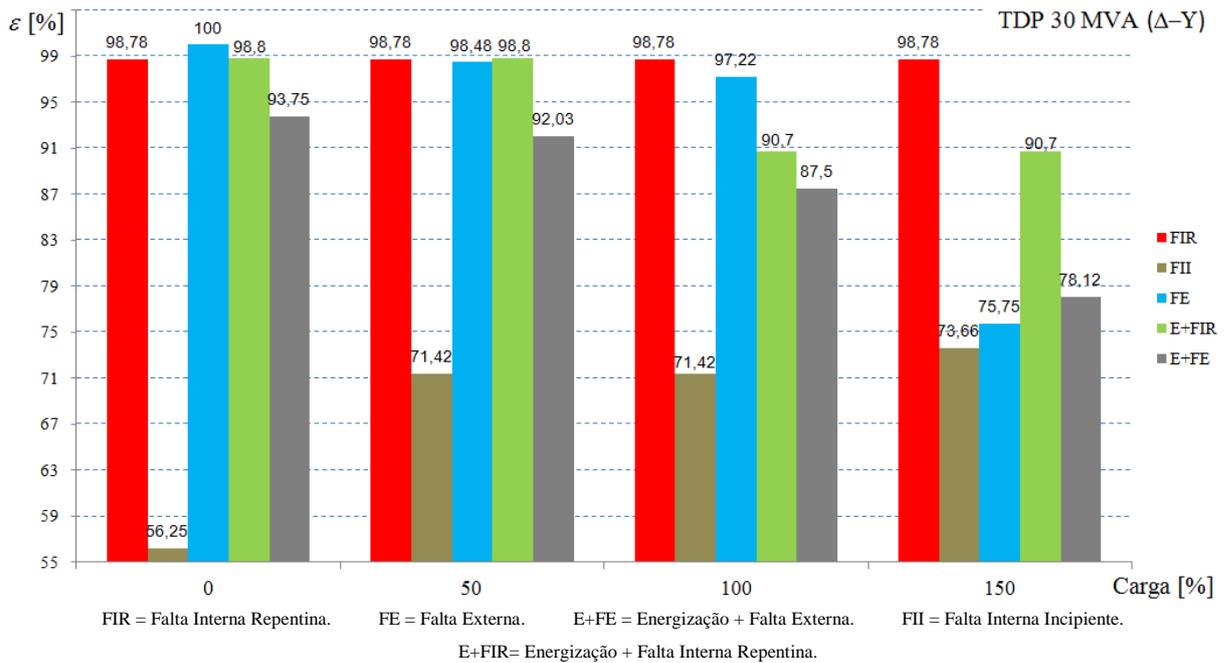
**Tabela 21** Desempenho do algoritmo para três tipos de TDP com nível de carga de 150 % e diferentes condições operacionais.

Nível de Carga Considerado na Análise: 150 %										
Condição Operacional	N° de Casos	TDP 30 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $Y - Y$ )		
		OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]
Faltas Internas Repentinhas	1.232	1.217	15	98,78	1.222	10	99,18	1.222	10	99,18
Faltas Internas Incipientes	224	165	3	73,66	165	3	73,66	165	3	73,66
Faltas Externas (na LT)	396	300	96	75,75	300	96	75,75	300	96	75,75
Energização ( <i>Inrush</i> )	168	160	8	95,23	162	6	96,42	162	6	96,42
Energização com Falta Interna	3.360	3.050	310	90,70	3.100	260	92,26	3.100	260	92,26
Energização com Falta Externa	640	500	140	78,12	520	120	81,25	520	120	81,25
Energização Solidária	24	24	0	100	24	0	100	24	0	100
Sobre-excitação	45	35	10	77,77	37	8	82,22	37	8	82,22
Faltas entre Enrolamentos	140	135	5	96,42	135	5	96,42	135	5	96,42
Total por TDP	6.005	5.421	584		5.500	505		5.500	505	
Eficiência Global				90,27			91,59			91,59

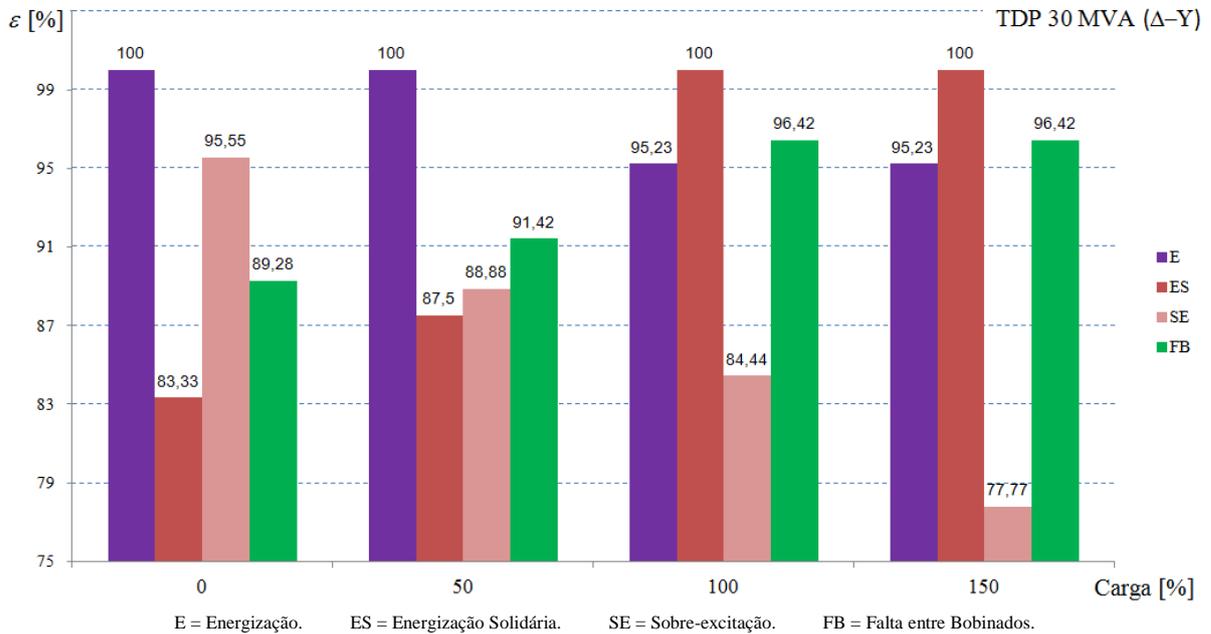
A Figura 40 e Figura 41 apresentam a variação de eficiência do algoritmo de proteção em função de diferentes condições de carga na LT para o TDP de 30 MVA. Pode-se observar que a precisão do algoritmo perante mudanças na carga não acusou uma variação importante quando da ocorrência de Faltas Internas Repentinhas (FIR). Destaca-se que a variação de eficiência nos três transformadores testados é similar, o que indica a independência da metodologia da potência e do grupo de conexão dos TDP estudados. Nesta análise o algoritmo atingiu uma eficiência mínima de 73,66 % e máxima de 100 %, para casos de FII e FE com valores máximos e mínimos de carga respectivamente.

Quanto à identificação de Faltas Internas Incipientes (FII) vale salientar que para faltas em 0,5 % do enrolamento não foi possível gerar correntes diferenciais no circuito de simulação. Nesse sentido, por falta de sinais para avaliação, a eficiência da metodologia proposta foi baixa neste tipo de eventos. Além disso, quando o nível de carga na LT foi o mais baixo (0 %) o algoritmo proposto teve dificuldades na discriminação de FII devido à caracterização de componentes harmônicas diferentes às utilizadas na discriminação deste tipo de faltas.

Tanto para o caso de Energização Solidária (ES) quanto para Falta entre Bobinados (FB) a eficiência do algoritmo de proteção foi em aumento junto ao aumento da carga, atingindo aumentos de eficiência de 16 % e 18 %, respectivamente.



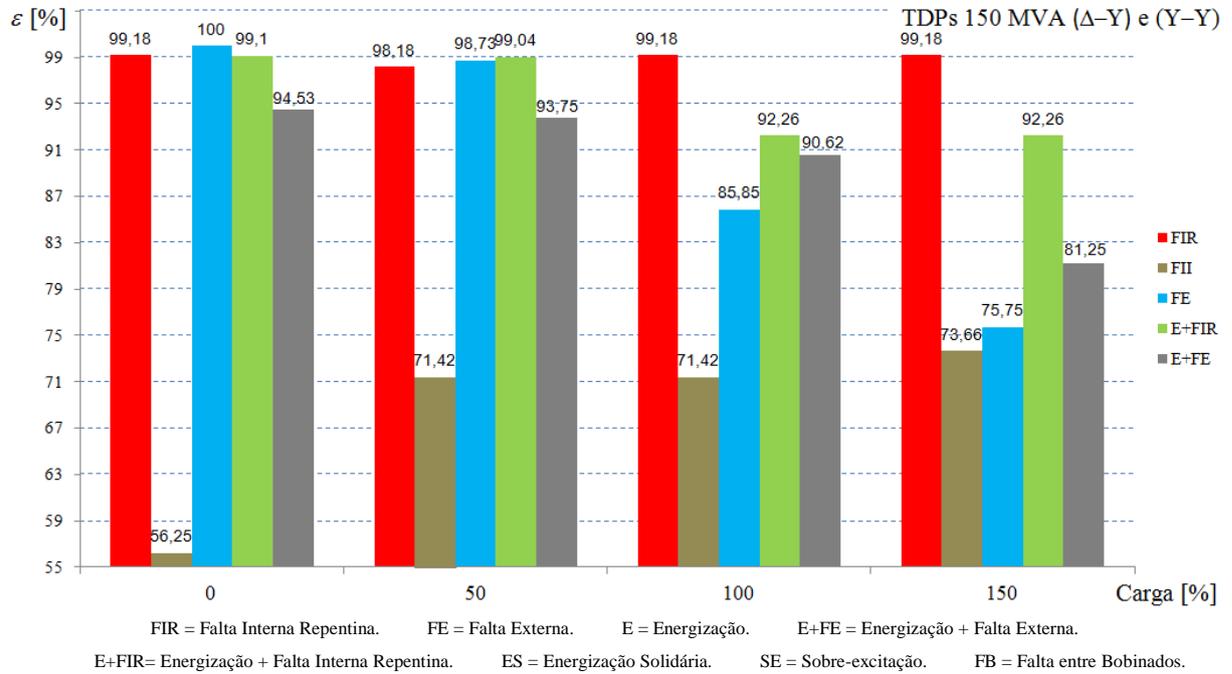
**Figura 40** Eficiência do algoritmo em função da carga na LT para o TDP de 30 MVA, Parte I.



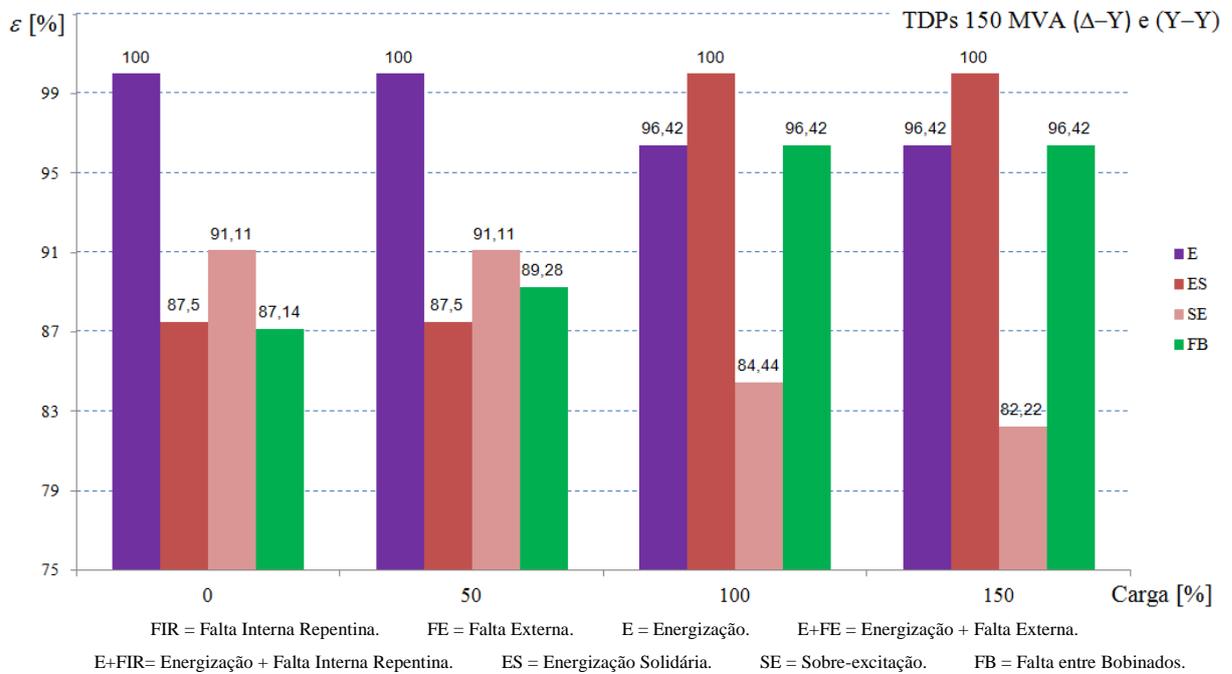
**Figura 41** Eficiência do algoritmo em função da carga na LT para o TDP de 30 MVA, Parte II.

A Figura 42 e Figura 43 ilustram a variação de eficiência do algoritmo de proteção em função de diferentes condições de carga na LT para os TDP de 150 MVA. Para valores de carga até 50 % o valor de eficiência manteve-se iguais para todos os eventos testados. Já para níveis de carga iguais e maiores a 100 % se observa uma queda de eficiência na discriminação de eventos tais como FE, E+FIR e E+FE. Vale salientar que a variação de eficiência em ambos os transformadores de 150 MVA é similar e, por tanto, independente do grupo de conexão dos TDP estudados.

Para os TDP de 150 MVA também houve um aumento de eficiência para a identificação tanto de ES quanto para FB. A discriminação de SE foi perdendo eficiência com o aumento da carga atingindo um valor mínimo de 82,22 % para um nível de carga de 150 %.



**Figura 42** Eficiência do algoritmo em função da carga na LT para os TDPs de 150 MVA, Parte I.



**Figura 43** Eficiência do algoritmo em função da carga na LT para os TDPs de 150 MVA, Parte II.

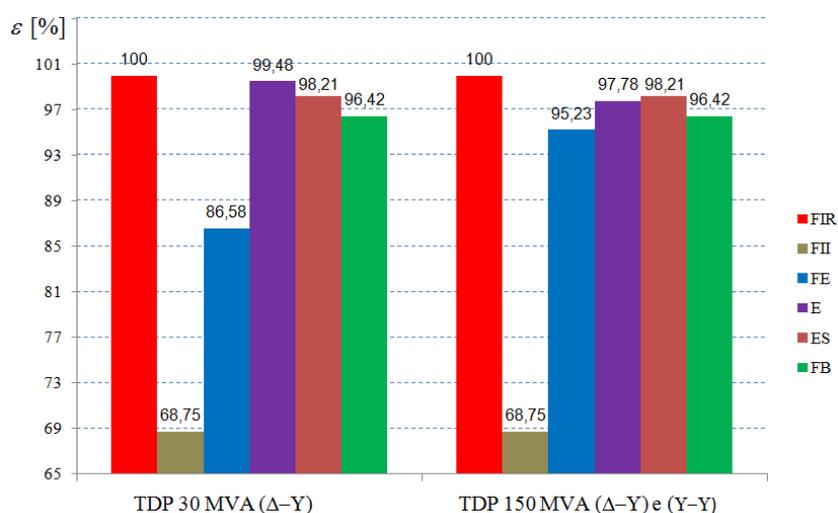
#### 4.4.4 Desempenho do Algoritmo Perante Variação do Fator de Potência da Carga

Na Tabela 22 apresentam-se os resultados de desempenho do algoritmo de proteção em função da variação do fator de potência da carga. Assim, o nível de carga conectada no final da LT foi mantido constante e igual à carga nominal de cada TDP trabalhando com um fator de carga de 0,9. Por outro lado, a  $R_f$  também foi mantida constante e igual a  $0,01 \Omega$ .

**Tabela 22** Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para três tipos de TDP considerando a variação do Fator de Potência (FP) a carga nominal.

Variação do FP da Carga: 0,68 → 0,98 (incrementos de 0,05)										
Condição Operacional	N° de Casos	TDP 30 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $Y - Y$ )		
		OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]
Faltas Internas Repentinas	308	308	0	100	308	0	100	308	0	100
Faltas Internas Incipientes	224	154	14	68,75	154	14	68,75	154	14	68,75
Faltas Externas (na LT)	693	600	93	86,58	660	33	95,23	660	33	95,23
Energização ( <i>Inrush</i> )	1176	1170	6	99,48	1150	26	97,78	1150	26	97,78
Energização Solidária	168	165	3	98,21	165	3	98,21	165	3	98,21
Faltas entre Enrolamentos	140	135	5	96,42	135	5	96,42	135	5	96,42
Total por TDP	2.485	2.378	107		2.418	67		2.418	67	
Eficiência Global				95,69			97,30			97,30

A Figura 44 ilustra a variação de eficiência do algoritmo de proteção em função da variação do fator de potência da carga na LT. A variação do FP foi desde 0,68 até 0,98 com incrementos de 0,5. A discriminação de FIR para os três tipos de TDP avaliados, foi ótima para todos os valores de FP considerados, atingindo um nível de eficiência de 100 %. Em ambos os transformadores de 150 MVA, os níveis de eficiência foram iguais para todos os eventos avaliados. Por outro lado, a eficiência global da metodologia de proteção apresentou melhores resultados para os TDP de 150 MVA (97,3 %) atingindo um valor de 95,69 % para o TDP de 30 MVA.



FIR = Falta Interna Repentina. FE = Falta Externa. E = Energização. ES = Energização Solidária. FB = Falta entre Bobinados.

**Figura 44** Variação da precisão do algoritmo em função do fator de potência.

#### 4.4.5 Desempenho do Algoritmo Perante Variação do Instante de Energização

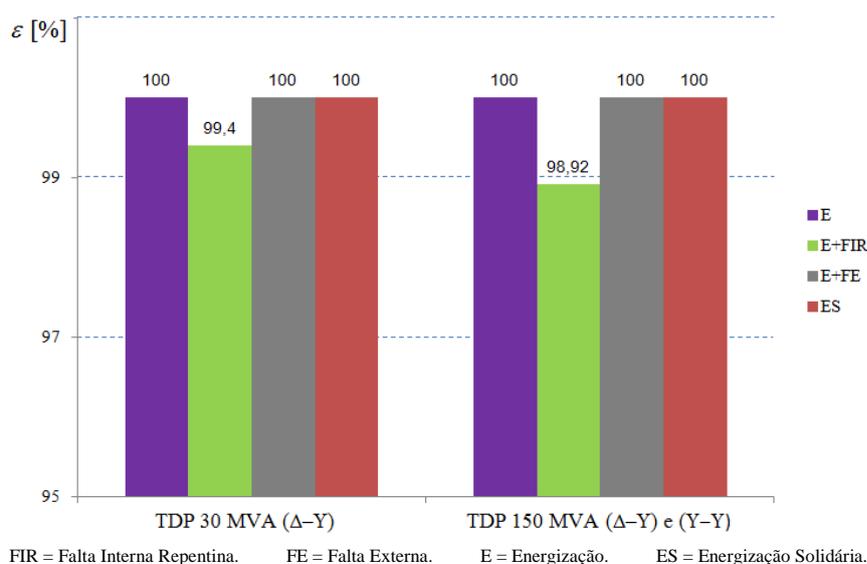
Na Tabela 23 apresentam-se os resultados de desempenho do algoritmo de proteção para diferentes instantes de energização dos TDPs. Assim, os eventos avaliados nesta etapa foram somente os relacionados com a energização dos transformadores. Esta análise foi desenvolvida considerando nível de carga nominal e FP constante.

**Tabela 23** Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para três tipos de TDP considerando a variação do instante de energização.

Variação do Instante de Energização: $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ e $0^\circ \rightarrow -90^\circ$ (incremento de $30^\circ$ )										
Condição Operacional	Nº de Casos	TDP 30 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $\Delta - Y$ )			TDP 150 MVA ( $Y - Y$ )		
		OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]	OC	OI	$\varepsilon$ [%]
Energização ( <i>Inrush</i> )	168	168	0	100	168	0	100	168	0	100
Energização com Falta Interna	840	835	5	99,40	831	9	98,92	931	9	98,92
Energização com Falta Externa	216	216	0	100	216	0	100	216	0	100
Energização Solidária	24	24	0	100	24	0	100	24	0	100
Total por TDP	1.248	5.569	436		5.601	404		5.601	404	
Eficiência Global				92,73			93,27			93,27

A Figura 45 ilustra a variação de eficiência do algoritmo de proteção em função da variação do instante de energização dos TDPs. A discriminação de E, ES e E+FE, para os três tipos de TDP avaliados, foram ótimas para todos os tempos de energização considerados atingindo um nível de eficiência de 100 %. Em ambos os transformadores de 150 MVA, os níveis de eficiência foram iguais para todos os eventos avaliados.

Segundo mostrado na Tabela 23, a eficiência global da metodologia de proteção foi máxima para os TDP de 150 MVA (93,27 %) atingindo um valor de 92,73 % para o TDP de 30 MVA.



**Figura 45** Variação da precisão do algoritmo em função do instante de energização.

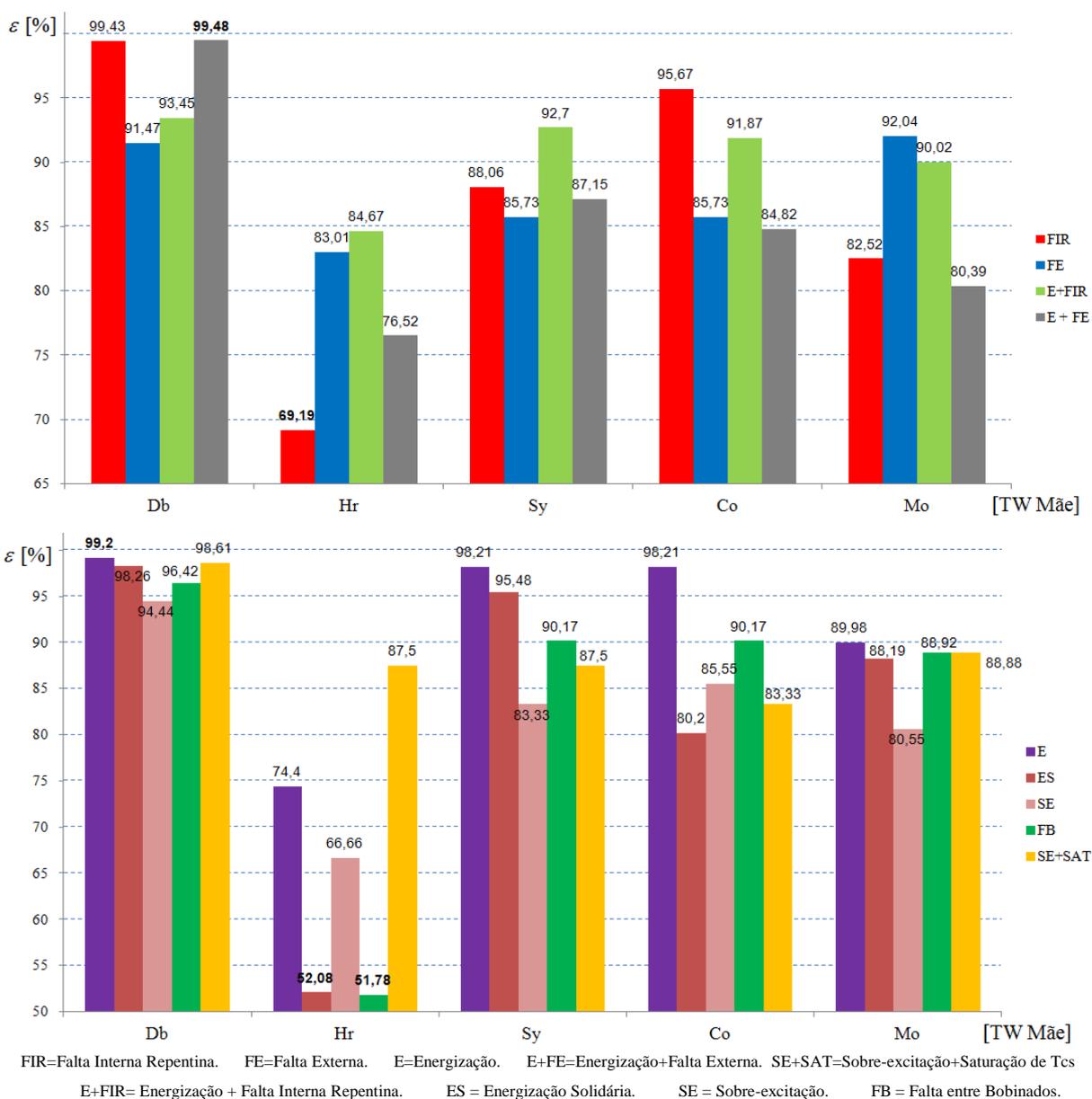
#### 4.4.6 Desempenho do Algoritmo Perante Variação da Função Wavelet

Outra variável capaz de influenciar a eficiência do processo lógico de decisão do algoritmo de proteção desenvolvido neste trabalho é a função wavelet escolhida para a análise. Assim, analogamente à escolha da função janela da Transformada de Fourier Janelada (TFJ), na análise wavelet pode-se escolher a wavelet mãe que melhor desempenho apresente para o estudo em questão. Neste trabalho, foi comparada a precisão de cinco tipos diferentes de wavelet mãe, as quais foram: Daubechies, Haar, Symlet, Coiflet e Morlet. Vale salientar que os testes foram feitos com uma frequência de amostragem constante. Na Tabela 24 apresentam-se os resultados do desempenho do algoritmo de proteção para diferentes funções wavelet.

**Tabela 24** Desempenho global do algoritmo de proteção diferencial considerando diferentes Funções Wavelets (Wavelets Mães).

Condição Operacional	Nº de Casos	Daubechies (Db)		Harr (Hr)		Symlet (Sy)		Coiflet (Co)		Morlet (Mo)	
		OC	$\varepsilon$ [%]	OC	$\varepsilon$ [%]	OC	$\varepsilon$ [%]	OC	$\varepsilon$ [%]	OC	$\varepsilon$ [%]
Faltas Internas Repentinhas	4.928	4.900	99,43	3.410	69,19	4.340	88,06	4.715	95,67	4.067	82,52
Faltas Externas (na LT)	1.584	1.449	91,47	1.315	83,01	1.358	85,73	1.358	85,73	1.458	92,04
Energização ( <i>Inrush</i> )	2.016	2.000	99,20	1.500	74,40	1.980	98,21	1.980	98,21	1.814	89,98
Energização com Falta Interna	3.360	3.140	93,45	2.845	84,67	3.115	92,70	3.087	91,87	3.025	90,02
Energização com Falta Externa	2.352	2340	99,48	1.800	76,52	2.050	87,15	1.995	84,82	1.891	80,39
Energização Solidária	288	283	98,26	150	52,08	275	95,48	231	80,20	254	88,19
Sobre-excitação	180	170	94,44	120	66,66	150	83,33	154	85,55	145	80,55
SE com Saturação TCs	360	355	98,61	315	87,50	315	87,50	300	83,33	320	88,88
Faltas entre Enrolamentos	560	540	96,42	290	51,78	505	90,17	505	90,17	498	88,92
Total por TDP	15.62	15.177		11.745		13.958		14.325		13.314	
Eficiência Global			97,11		75,15		89,31		91,66		85,19

A Figura 46 ilustra a variação de eficiência do algoritmo de proteção em função da variação da função wavelet utilizada na rotina computacional de discriminação do algoritmo. Após a comparação e avaliação desta metodologia com as diferentes funções wavelet testadas, verificou-se que a wavelet mãe tipo Daubechies apresentou um excelente desempenho e uma alta eficiência na discriminação dos distúrbios simulados. As wavelet mães Symlet, Coiflet e Morlet mostraram-se com um desempenho satisfatório, mas com uma eficiência menor que a wavelet Daubechies. Já a wavelet mãe tipo Haar não atingiu um bom desempenho, mostrando muitas imprecisões na discriminação dos distúrbios simulados.



**Figura 46** Variação da precisão do algoritmo em função da função wavelet.

#### 4.4.7 Desempenho do Algoritmo Perante a Técnica Tradicional de Fourier

Nesta seção se apresenta uma comparação entre a metodologia proposta e a técnica convencional de proteção diferencial no intuito de avaliar as ferramentas em questão objetivando concluir sobre as vantagens e desvantagens de cada método desde o ponto de vista da eficiência global. A Tabela 25 apresenta o desempenho global de cada uma das funções wavelets testadas quando comparadas com a técnica convencional baseada na Transformada de Fourier Janelada (TFJ). Nesta comparação somente foram testadas as funções wavelet mais eficientes para cada condição operacional estudada. Assim, a wavelet mãe Daubechies foi comparada com a TFJ na maioria das situações simuladas, menos no caso de Falta Externa onde foi utilizada na comparação a wavelet tipo Morlet. Lembremos que a análise de Fourier baseia-se na magnitude da segunda harmônica contida no sinal estudado. Se essa magnitude ultrapassa em 16 % o valor da componente principal, o relé diferencial discrimina o sinal como sendo um fenômeno de energização. Por outro lado, se a magnitude

da 5ª harmônica ultrapassar em 7 % o valor da fundamental o relé convencional discrimina o evento como sendo sobre-excitação (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

**Tabela 25** Comparação do desempenho global do algoritmo de proteção diferencial proposto com a Técnica de Fourier.

Condição Operacional	N total de Casos	Tipo de Wavelet	Metodologia Proposta		Método Convencional	
			OC	$\varepsilon$ [%]	OC	$\varepsilon$ [%]
Faltas Internas Repentinas	4.928	Db	4.900	99,43	4.068	82,55
Faltas Externas (na LT)	1.584	Mo	1.458	92,4	1.560	98,52
Energização ( <i>Inrush</i> )	2.016	Db	2.000	99,20	1.476	73,25
Energização com Falta Interna	3.360	Db	3.140	93,45	2.393	71,24
Energização com Falta Externa	2.352	Db	2.340	99,48	2.237	70,15
Energização Solidária	288	Db	283	98,26	2840	88,65
Sobre-excitação	180	Db	170	94,44	178	98,95
SE com Saturação TCs	360	Db	355	98,61	271	55,45
Faltas entre Enrolamentos	560	Db	540	96,42	535	75,55
Total por TDP	15.628		15.186		13.321	
Eficiência Global			97,17		85,23	

Pode-se afirmar que, segundo os resultados de comparação obtidos, a técnica proposta apresenta desempenhos superiores à técnica convencional na maioria dos eventos testados. No entanto, nos casos de Faltas Externas e Sobre-excitação a TFJ mostrou-se mais eficiente no processo de discriminação. Esta maior eficiência em relação à técnica wavelet deve-se a que as situações de faltas externas e sobre-excitação apresentam componentes harmônicas bem definidas que permitem uma boa discriminação pela técnica de Fourier. No entanto, observa-se que a saturação dos TCs influencia negativamente a técnica convencional devido, principalmente, à deformação das correntes secundárias levando a eficiência deste método a níveis baixos quando comparados à técnica proposta. Vale salientar que a metodologia de proteção proposta não utiliza os valores de componentes harmônicas no processo de discriminação dos eventos, fato que torna esta técnica mais robusta perante a saturação dos TCs.

## 4.5 Sumário

Neste capítulo foi apresentado o estudo de caso dos testes realizados com a metodologia de proteção proposta. Uma descrição da modelagem do sistema elétrico utilizado na simulação dos diferentes eventos estudados foi também apresentada neste capítulo.

Os testes realizados foram apresentados neste capítulo através de tabelas que mostram quais parâmetros foram considerados em cada evento simulado.

Por fim, apresentam-se os resultados obtidos da aplicação do algoritmo de proteção na discriminação dos eventos estudados e mostra-se a variação da sua eficiência com a mudança da resistência de falta, da carga conectada na LT, do fator de potência da carga, do instante de energização dos TDP e por fim da função wavelet utilizada na análise.

Dando fechamento a este trabalho, no próximo capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas com o estudo realizado.

## 5. CONCLUSÕES

A proteção diferencial convencional apresenta uma eficiência limitada quando da identificação e caracterização de fenômenos transitórios que venham acontecer em Transformadores de Potência (TDP). Diante disso, o presente trabalho apresentou o desenvolvimento e aprimoramento de uma metodologia computacional para proteção diferencial adaptativa baseada na análise de componentes de detalhes wavelets. Como resultado desta pesquisa foram estabelecidas contribuições ao estado da arte, as quais podem ser sumarizadas em três tópicos:

- contribuição ao método de proteção diferencial de TDP através da proposta de uma metodologia baseada na análise de variação de energia espectral dos coeficientes de detalhe wavelet gerada pelos eventos estudados;
- contribuição para a determinação de correntes diferenciais faltosas e caracterização do tipo de evento provocador das correntes diferenciais, transitórias ou não transitórias, mediante o aprimoramento e desenvolvimento de formulação analítica baseada na Transformada Wavelet Discreta (TWD);
- contribuição ao estudo da proteção diferencial de TDP através da proposta de uma metodologia adaptativa testada em varias condições operacionais adversas.

Para contemplar as contribuições citadas, avaliaram-se os principais modelos matemáticos de representação de transformadores para estudo e simulação de fenômenos transitórios. Por outro lado, a metodologia concebida neste trabalho fundamentou-se no desenvolvimento de algoritmos computacionais com enfoque numérico, enfatizando aspectos vinculados à conceituação do problema, formulação analítica e construção computacional, incluindo a apresentação de resultados e validação do método proposto.

Na etapa de geração de dados, utilizou-se o programa ATP/EMTP no qual os sinais de correntes diferenciais trifásicas foram obtidos para as diversas situações operacionais envolvidas neste estudo. O *software* referido permite simulações de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas de quaisquer configurações. O banco de dados empregado no trabalho representou todas as situações de significativa importância no contexto da proteção diferencial de TDP.

Levando-se em conta seu procedimento de construção (o qual pode ser considerado robusto e de relativa facilidade de programação), seu bom desempenho computacional (método estável e sem problemas de convergência) e sua precisão, a abordagem proposta baseada na quantificação de energia espectral em cada nível de detalhe da decomposição wavelet, mostrou ser uma alternativa eficiente e confiável para o estudo de fenômenos faltosos e não faltosos (transitórios) em TDP. Dada estas características, o algoritmo proposto apresenta uma boa perspectiva de aplicação prática, considerando a simplicidade teórica na qual se baseia a metodologia de discriminação. Além disso, acredita-se que a construção computacional

permitirá a adaptação desse algoritmo como uma sub-rotina do programa principal de decisão lógica de um relé diferencial convencional objetivando melhorar sua eficiência e sensibilidade principalmente perante situações transitórias. Além disso, constatou-se que o equacionamento desenvolvido para a idealização do mecanismo de discriminação entre situações de falta interna, falta externa e situações transitórias sobre o TDP pode ser incorporado à rotina computacional dos relés diferenciais convencionais de uma forma generalista, independentemente das características elétricas do sistema protegido sem ocasionar problemas de estabilidade ao método de proteção convencional baseado na Transformada de Fourier. Todavia, contemplando a inovação associada a esta Tese de Doutorado, o estabelecimento de limiar adaptativo, com base na utilização da variação de corrente diferencial no transformador, conduz a uma metodologia de proteção eficiente e robusta com grande perspectiva de aplicação real.

Na formulação apresentada, o efeito da saturação dos TCs sob a precisão do método de proteção foi também considerado objetivando verificar a robustez do algoritmo à análise de correntes diferenciais geradas pela distorção das correntes secundárias dos TCs saturados. Com base em simulações realizadas e tendo-se como referência recomendações encontradas no estado da arte para modelagem de transformadores de medição, constatou-se que o efeito da saturação dos TCs não gera problemas na discriminação dos eventos efetuada pelo algoritmo proposto dado que o mesmo não interfere nos coeficientes de detalhe utilizados para calcular a variação de energia espectral. Além disso, a saturação de TCs foi constatada somente naquelas simulações correspondentes aos casos de faltas externas ao transformador. Por outro lado, na rotina computacional do algoritmo proposto foi construído um equacionamento encarregado de corrigir a defasagem angular provocada pelos grupos de conexão do TDP testados. Essa correção angular das tensões é feita antes do sinal de corrente diferencial ser analisada pelo algoritmo e se mostrou útil na hora de identificar e discriminar os eventos geradores de correntes diferenciais no circuito de proteção.

Importantes constatações foram realizadas com ênfase na eficiência do algoritmo proposto, considerando os aspectos mais relevantes para suas aplicabilidades, como precisão, velocidade de atuação e estrutura das ferramentas. Neste sentido, destaca-se que os resultados encorajadores, conseguidos pela construção do algoritmo baseado na variação de energia espectral nos coeficiente de detalhe wavelet, foram gerados pelos testes realizados com dados advindos, inclusive, de diferentes tipos de transformadores. Assim, foi constatada desta forma a flexibilidade do método proposto a modificações relacionadas ao tamanho do TDP, grupos de conexão e níveis de tensão.

Os resultados obtidos foram satisfatórios uma vez que apresentaram uma correta discriminação dos diferentes distúrbios simulados no sistema elétrico utilizado como estudo de caso. Neste sentido, o algoritmo proposto apresenta segurança e confiabilidade tendo a vantagem de ser simples e rápido dado que a metodologia somente utiliza informações de um quarto de ciclo pós-falta do sinal de corrente diferencial para discriminar o distúrbio que esta acontecendo no TDP.

Vale salientar que o algoritmo proposto baseia-se no comportamento qualitativo da forma de onda da corrente diferencial e, portanto, a metodologia de proteção mostrou-se robusta e insensível às mudanças nos parâmetros elétricos do sistema utilizado nas simulações dado que somente altera numericamente os valores de corrente, mais não modifica o fenômeno físico e assim a informação contida nas formas de onda não é afetada.

Analisando de maneira mais pontual cada variável relacionada à eficiência do método proposto, a seguir serão discutidas as principais conclusões e constatações obtidas ao longo desta pesquisa.

## 5.1 Modelagem de Transformadores para Análise de Transitórios

Os SEP estão constantemente expostos à ocorrência de fenômenos transitórios originados por eventos como, por exemplo, faltas elétricas, manobras de operação e fenômenos atmosféricos. Esses transitórios eletromagnéticos geram sinais que abrangem um amplo espectro de frequências e que influencia de forma relevante tanto no desempenho dos sistemas de proteção quanto no correto funcionamento de transformadores, geradores, reatores, banco de capacitores, entre outros. Deste modo, a modelagem de transformadores para estudo de fenômenos transitórios eletromagnéticos não é trivial principalmente por existirem um grande número de diferentes tipos de transformadores e, portanto, muitos projetos de núcleos. Além disso, na configuração construtiva do transformador há parâmetros que apresentam comportamento não linear e dependente da frequência.

Neste contexto, este trabalho apresentou as principais considerações para a modelagem de transformadores junto aos critérios utilizados para a classificação dos modelos existentes. Apresentaram-se também as abordagens utilizadas para a modelagem de transformadores em estudos de transitórios eletromagnéticos de baixa, média e alta frequência. A modelagem do transformador em função do tipo de representação também foi abordada neste trabalho onde se descreve o comportamento linear e não linear do transformador. O objetivo principal desta análise é apresentar uma revisão detalhada das principais abordagens sobre a modelagem dos TDP visando contribuir e facilitar a representação desta máquina em futuros estudos de transitórios eletromagnéticos.

Baseando-se no estudo bibliográfico realizado, constatou-se que vários modelos com diferentes graus de complexidade foram construídos em simuladores numéricos para representar o comportamento transitório dos transformadores. No entanto, deve-se atentar ao fato de que muitos modelos necessitam de parâmetros cuja determinação depende da geometria dos enrolamentos e do núcleo do transformador, informações que normalmente não estão disponíveis para os usuários de simuladores de transitórios eletromagnéticos. Além disso, eles não necessariamente consideram as mesmas características construtivas do equipamento e geralmente são classificados em função de diversos critérios dado o fato que cada modelo considera parâmetros distintos. Vários trabalhos propõem que o modelo do transformador seja dividido em duas partes: a representação dos enrolamentos e a representação do núcleo de ferro, dado que os enrolamentos possuem características lineares, enquanto o núcleo de ferro possui um comportamento não linear devido principalmente às perdas por histerese e às correntes induzidas.

A modelagem correta do transformador para simulação de faltas internas através dos *softwares* comercialmente disponíveis apresenta uma série de dificuldades. A grande quantidade de projetos de núcleos e a incerteza em quanto ao comportamento não linear de muitos parâmetros dos transformadores trifásicos tornam complicada a escolha do modelo a utilizar. Além disso, importante informação construtiva do transformador (valores de capacitância nos enrolamentos, perdas magnéticas, entre outras) não está abertamente disponível para estudos de pesquisa que sejam desenvolvidos fora das empresas construtoras, fato que dificulta a obtenção de dados para a modelagem da máquina.

Tendo-se como base os principais modelos desenvolvidos para a representação computacional de fenômenos transitórios em TDP, buscou-se uma aproximação para a solução do problema, de modo a contornar as limitações dos modelos existentes, os quais se caracterizam principalmente por ser muito simplificados. Deste modo, dentre os modelos estudados, o modelo híbrido (*Hybrid Transformer*) disponível no ATP/EMTP mostrou ser uma alternativa adequada para a solução do problema em questão dado que é válido na faixa de frequência de interesse e permite considerar diferentes topologias construtivas e tipos de transformadores. Especialmente para o estudo de correntes de energização, o modelo híbrido mostrou ser

apropriado dado que oferece a modificação de parâmetros construtivos (como as dimensões do núcleo) que influenciam nos valores máximos da corrente de *inrush*.

Este modelo permite também o estudo de transformadores que estejam ainda em fase de projeto, permitindo assim futuras modificações nos cálculos caso seja constatada alguma deficiência no comportamento do equipamento. Neste modelo podem ser representados transformadores de dois ou três enrolamentos e todos os grupos de conexão são suportados. O modelo inclui uma matriz de indutância inversa para representação da dispersão, resistência dos enrolamentos (dependente da frequência), capacitâncias de acoplamento e podem ser considerados núcleos de três ou cinco colunas com saturação individual o que é aplicável ao estudo de energização para cada fase. Vale salientar que a lista de materiais para representação do núcleo é limitada dado que somente inclui materiais atuais, e assim a representação de transformadores antigos resultaria em perdas no núcleo muito baixas. O modelo híbrido torna-se adequado para estudos de fenômenos até uma frequência de 3 a 5 kHz o que contempla fenômenos tais como energização de transformadores, ferro-ressonância, rejeição de carga, curtos-circuitos e excitação de TDP. No entanto, não reproduz todos os comportamentos transitórios corretamente dado que ainda encontra-se em fase de desenvolvimento.

Por outro lado, o modelo BCTRAN foi utilizado neste trabalho para a simulação de faltas internas incipientes devido à possibilidade de modificar os elementos da matriz de resistências e impedâncias (próprias e mutuas) para a simulação tanto de faltas espira-espira como faltas espira-terra. No entanto, este modelo apresenta limitações em relação aos tipos de transformadores existentes (grupos de conexão, tipos de materiais do núcleo, entre outros) o que torna a análise de faltas internas incipientes muito simplificadas.

## 5.2 Utilização da Transformada Wavelet Discreta

A Transformada Wavelet (TW) foi introduzida na área de engenharia elétrica como um método de análise para transitórios eletromagnéticos associados com faltas e chaveamentos em SEP. A maior parte das aplicações desenvolvidas na área de proteção de SEP utiliza dados obtidos a partir de simulações computacionais desenvolvidas com *softwares* como ATP/EMTP, dados que são processados posteriormente mediante algoritmos construídos, geralmente, em ambiente MATLAB®.

A utilização da Transformada Wavelet Discreta (TWD) para o estudo e avaliação dos sinais diferenciais faltosos ou transitórios produzidos pelos distúrbios e manobras que acontecem sob os TDP mostrou-se como uma ferramenta eficiente e robusta, fornecendo um ótimo desempenho ao algoritmo desenvolvido neste trabalho. A eficiência desta ferramenta matemática deve-se a sua capacidade para extração de características do sinal em estudo no plano tempo-frequência.

A variação de energia espectral dos coeficientes de detalhe wavelets mostrou-se como um parâmetro de discriminação eficiente. A análise multi-resolução fornecido pela TWD permite caracterizar os eventos estudados segundo os coeficientes de detalhe calculados em cada faixa de frequência. No entanto, a frequência de amostragem tem muita influência na metodologia proposta dado que a cada nível de detalhe temos menos coeficientes wavelet para a análise. Assim, é importante considerar sempre uma taxa de amostragem que permita a decomposição do sinal em estudo em pelo menos cinco níveis de detalhe.

Constatou-se que a determinação da relação de energia espectral entre os diferentes níveis de detalhe conferem ao método estabilidade numérica e robustez computacional. Ainda, a determinação de relações de energia de detalhe constante para cada nível de decomposição, obtida de forma heurística, propicia a incorporação da metodologia a um algoritmo de caráter

generalizado, independente das propriedades do sistema elétrico, características técnicas e parâmetros do transformador.

Os desenvolvimentos teóricos necessários para melhorar qualquer estudo na área das TW, se direcionam no sentido de escolher adequadamente o tipo de wavelet mãe (função wavelet) para cada aplicação específica. Nesse sentido, apresenta-se a seguir uma análise relacionada com a avaliação de vários tipos de wavelet mães objetivando determinar a que melhor se desempenhe na discriminação dos distúrbios estudados.

### **5.3 Influência da Wavelet Mãe Utilizada no Processo de Discriminação**

A TW de um sinal não é única, pois depende dos filtros passa-baixa e passa-alta utilizados no processo de decomposição do sinal de corrente diferencial, ou seja, depende da wavelet mãe que está sendo utilizada no processo de decomposição. Logo, um parâmetro chave para trabalhar com a TW é a escolha da wavelet mãe que será empregada no processo de transformação o que será refletida na maior ou menor eficiência do método proposto.

As simulações efetuadas mostraram que a família Daubechies (Db) apresentou o melhor desempenho na discriminação dos eventos quando comparada com outras famílias tais como Symlet (Sy), Haar (Hr), Coiflet (Co) e Morlet (Mo). Em termos de eficiência global, a família Dd apresentou uma precisão mínima de 91,47 % para a detecção de faltas externas ao TDP e uma precisão percentual máxima de 99,48 % quando da discriminação de energização junto às faltas externas (evento combinado). Ainda, dentro desta família, a Db4 foi a mais eficiente dado que apresentou as melhores respostas quando observado seu desempenho na extração de características da corrente diferencial para as várias situações testadas.

As wavelet mães Sy, Co e Mo mostraram-se com um desempenho satisfatório, no entanto, com uma eficiência menor que a wavelet Db. As famílias Sy e Co tiveram uma eficiência máxima de 98,21 % na discriminação de energização e a família Mo atingiu uma eficiência de 92,04 % na identificação de faltas externas.

Já a wavelet mãe tipo Hr não atingiu um bom desempenho, apresentando muitas imprecisões na discriminação dos distúrbios simulados e atingindo a menor eficiência em todos os testes com um valor de 52,08 % correspondente à identificação de energização solidária de transformadores.

Avaliando cada contingência individualmente observa-se que a maior eficiência do algoritmo (91,98 %), para todas as wavelet mãe testadas, corresponde ao fenômeno de energização enquanto que a identificação de energização solidária apresenta uma eficiência de 52,78 %.

Verificou-se também que quanto maior é a quantidade de coeficientes de detalhe, o qual depende diretamente da taxa de amostragem, melhor é a classificação de fenômenos com variações lentas como a sobre-excitação de transformadores.

### **5.4 Influência da Resistência de Falta**

Com base nos testes realizados, notou-se que o aumento da resistência de falta ( $R_f$ ), quando da ocorrência de faltas internas e externas ao TDP, produz uma queda na eficiência global do algoritmo de proteção. Neste sentido, a eficiência do mesmo passa de um máximo de 100 % (para discriminação de faltas externas) a um valor mínimo de 87,5 % (para discriminação de energização junto a falta interna) o que representa uma perda de precisão de 12,5 % para o algoritmo de proteção. A ocorrência de eventos combinados, ou seja, eventos que foram simulados conjuntamente fazem com que em determinados casos, a precisão do algoritmo decresça pelo fato de apresentarem variações de energia espectral que estão fora da variação padrão contidas nos patamares de discriminação do algoritmo. No entanto, estes eventos têm pouca probabilidade de ocorrência em situações reais.

Vale salientar que para valores de  $R_f$  iguais a  $500 \Omega$ , não foi possível identificar correntes diferenciais quando da ocorrência de faltas externas no circuito de simulação o que impossibilitou a avaliação do algoritmo para este valor de resistência de falta externa.

Pode-se verificar que, independentemente do tipo de conexão do TDP ( $\Delta$ -Y ou Y- $\Delta$ ) a eficiência do algoritmo para cada evento estudado é sempre a mesma, considerando transformadores de igual potência nominal. Por outro lado, se a potência do transformador aumenta a eficiência da metodologia de proteção experimenta um pequeno aumento, que medido em termos globais é de 5 %.

No caso particular de simulação de energização acontecendo junto à falta externa, se tem um aumento na eficiência devido ao fato de que as faltas de alta impedância poderiam produzir uma variação de energia espectral muito similar à variação produzida pela energização, o que facilitaria a discriminação do evento pelo algoritmo.

Vale salientar que nesta análise foi mantido constante o nível de carga em 100 % e o fator de potência em 0,92 indutivo pelo qual estes parâmetros não tiveram influência na eficiência do algoritmo proposto sendo avaliados individualmente como apresentado a seguir.

### **5.5 Influência da Carga Conectada ao Transformador**

Comparações realizadas com abordagem sob o enfoque de variação de parâmetros sinalizaram que o nível de carga tem participação sob um maior número de eventos tanto nas situações faltosas como não faltosas. Com base nas simulações efetuadas constatou-se que a variação da carga conectada no final da linha de transmissão, não apresentou inconveniente para o desempenho da metodologia proposta enquanto à discriminação de faltas internas repentinas. Deste modo, houve uma queda de 4 % na eficiência global da metodologia de proteção.

Faltas externas, energização junto a falta externa e sobre-excitação são os eventos mais influenciados pelo aumento de carga apresentando uma queda na eficiência da metodologia para variações de carga superiores a 75 % do valor nominal. No entanto, nem em todos os casos simulados o aumento de carga mostrou-se prejudicial para a correta discriminação dos eventos. Nesse sentido, o algoritmo experimentou um aumento de eficiência proporcional ao aumento da carga para situações de energização solidária e faltas entre bobinados para os três tipos de transformadores testados.

Por outro lado, observou-se que a eficiência global não muda com a carga para diferentes potências nominais de TDP e grupos de conexão mantendo-se com os mesmos valores em cada evento estudado.

### **5.6 Estudo de Faltas Internas Incipientes**

Como detalhado na bibliografia existente, 70–80 % das faltas em TDP são produzidas ou provocadas por curto-circuitos entre espiras no enrolamento do transformador. Geralmente existe um período de envelhecimento e formação de arcos elétricos antes de acontecer um curto-circuito interno. Estas faltas incipientes são difíceis de detectar e podem se converter gradualmente em curto-circuitos internos severos. Assim, a detecção de faltas incipientes é um alarme que permite tomar os cuidados correspondentes para evitar danos maiores nos transformadores. Dado que a falha inicial na isolação entre espiras não gera suficiente corrente na linha, os relés diferenciais tradicionais não tem a sensibilidade para detectar tais faltas e assim o TDP somente será retirado da operação quando o curto-circuito interno tenha atingido um número considerável de espiras.

Neste trabalho, foi analisada a mudança experimentada pelas harmônicas quando da ocorrência de faltas internas incipientes em TDP. Desta análise constatou-se que existe uma mudança características em algumas componentes harmônicas e isso foi utilizado para detectar este tipo de faltas. Os testes apresentaram que a componente de 3ª harmônica incrementam seus valores a mais de 50 % no instante de ocorrência da falta interna incipiente e logo decrescem novamente a valores normais de operação em aproximadamente um ciclo (0,0166 segundos). No entanto, para poder validar este resultado foi necessário fazer a análise comparativa com outras condições transitórias que podem acontecer no transformador. Nesse sentido, foi feito um estudo do comportamento da 3ª harmônica para faltas internas repentinas e energização do transformador considerando, em ambos os casos, variação de carga (0 – 150 %) e variação de fator de potência para cada tipo de TDP. As simulações mostraram que, para faltas internas repentinas e energização, com variações de carga maiores a 25 %, a componente de 3ª harmônica aumentam seu valor no instante de falta, mas não atingem o nível de variação observado no caso de faltas internas incipientes sem carga.

A partir disso, ficou demonstrado que as faltas internas incipientes podem ser detectadas e discriminadas a partir da observação e monitoramento das características particulares do conteúdo de harmônico contido no sinal de corrente diferencial. Vale salientar que além da 3ª outras componentes harmônicas apresentam variações, no entanto, não atingem um nível considerável e adequado para ser utilizado como parâmetro discriminador de faltas incipientes. Além disso observou-se que o nível atingido pela 3ª harmônica em relação à componente fundamental mantém-se durante um tempo pouco maior que meio ciclo, fato que não prejudica a discriminação do evento dado que o parâmetro utilizado é o aumento no valor máximo da componente e não o tempo de duração do incremento da componente harmônica.

Levando-se em conta sua simplicidade de operação, acredita-se que esta técnica de discriminação de faltas incipientes poderia ser utilizada como complemento do algoritmo de proteção diferencial tradicional objetivando aumentar a sua sensibilidade.

## **5.7 Estudo de Comparação com a Técnica de Fourier**

A partir do estudo comparativo entre a metodologia proposta e a metodologia de proteção tradicional baseada na análise de Fourier, se observou que a técnica de análise das correntes diferenciais através na Transformada de Fourier apresenta uma eficiência menor à técnica baseada na variação de energia espectral. Nesse sentido, a elevada eficiência operacional atingida mostra a vantagem que a análise wavelet apresenta em relação a outras ferramentas de diagnóstico. A principal característica da técnica proposta é que a mesma independe dos valores atingidos pelas componentes harmônicas da corrente diferencial, fato que a torna mais eficiente que a técnica convencional de Fourier. Além disso, vale salientar que a metodologia baseada na decomposição harmônica precisa de pelo menos um ciclo de frequência fundamental de dados para fornecer uma resposta a um sinal de corrente diferencial.

## **5.8 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Esta tese teve como objetivo contribuir para o aprimoramento da filosofia de proteção diferencial de TDP sob um enfoque de análise de situações faltosas e transitórias. Levando-se em conta a parcela reduzida de pesquisas relacionada com os efeitos dos fenômenos transitórios na proteção de TDP, se comparada à abordagem em regime permanente, uma grande área de estudo ainda é passível de investigação.

Cabe comentar que os resultados apresentados mostraram-se promissores, entretanto, melhorias de desempenho ainda podem ser obtidas, deixando uma margem para a continuidade desta linha de pesquisa. Apontando então para tópicos específicos, sugerem-se

como desenvolvimento de trabalhos futuros e aprimoramento deste estudo as seguintes linhas de investigação:

- aprimoramento e teste da metodologia proposta para discriminação de eventos perante situações de cargas não lineares no TDP as quais provocam distorções na forma de onda da corrente diferencial;
- validação da metodologia proposta para potências maiores de transformadores dado que a magnitude da corrente de *inrush* depende da capacidade do transformador e da curva de saturação do mesmo;
- realização de pesquisas mais aprofundadas para modelagem, construção e teste de metodologias de proteção diferencial para transformadores com enrolamento terciário;
- aplicação da metodologia proposta para proteção de autotransformadores;
- estudo da metodologia de proteção para aplicação em casos de faltas internas incipientes entre o enrolamento primário e secundário do TDP considerando tanto a variação das impedâncias dos enrolamentos quanto o grau de envelhecimento do transformador.
- avaliação da metodologia proposta em TDP instalados em subestações. Neste trabalho somente foi avaliado a caracterização de faltas externas em linhas, no entanto, resulta interessante caracterizar faltas externas ao TDP em outras aplicações que não sejam somente na transmissão de energia.
- substituição de dados de simulação por valores reais, obtidos através de ensaios em campo de TDP a partir do momento em que a elaboração de um protótipo do relé diferencial digital for iniciada.
- adequação do algoritmo para aplicação em outras áreas da proteção digital dos SEP, como por exemplo, à proteção de linhas de transmissão e distribuição, proteção de barramentos, entre outras.
- estudo de um novo modelo de transformadores de potência adequado para a simulação e análise de faltas internas incipientes.
- avaliação da metodologia perante condições de distorção harmônica da tensão e/ou corrente nos terminais primários e secundário do TDP.
- verificação de suportabilidade da metodologia proposta a transientes ultrarrápidos de tensão, típicos das operações em subestações isoladas a gás.
- estudo de faltas internas em TDP considerando a distribuição de uma tensão de impulso (por exemplo, sobretensões transitórias) ao longo dos enrolamentos considerando a modelagem do mesmo como sendo uma LT.

Além das sugestões de trabalhos futuros diretamente relacionados com o estudo desenvolvido nesta tese, vale salientar aqui a importância crescente que esta sendo dada à tecnologia aplicada às redes elétricas objetivando torná-las inteligentes (*smart grid*). Neste sentido, os transformadores tornam-se elementos estratégicos para a implantação do conceito *smart grid* dado que estabelecem pontos de comunicação e coleta de dados entre redes de diferentes níveis de tensão. Por outro lado, toda tecnologia que venha aumentar a confiabilidade dos processos de detecção e localização de falhas, bem como a capacidade de autodiagnóstico eletromecânico de transformadores traz amplos benefícios econômicos tanto para as concessionárias quanto para os clientes.

## REFERÊNCIAS

- ABED, N. Y.; MOHAMMED, O. A. Modeling and Characterization of Transformer Internal Faults Using Finite Element and Discrete Wavelet Transforms. **IEEE Transaction on Magnetics**, Piscataway, v. 43, n. 4, p. 1425-1428, Apr. 2007.
- ADDISON, P. S. **The Illustrated Wavelet Transform Handbook**: introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance. Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2002. ISBN: 0-7503-0692-0.
- AKOREDE, M. F.; HIZAM, H. Wavelet Transforms: practical applications in power systems. **Journal of Electrical Engineering & Technology**, Korea, v. 4, n. 2, p. 168-174, Apr. 2009.
- ANDERSON, P. M. **Power System Protection**. New York: IEEE Press, McGraw Hill, 1999. ISBN: 0-7803-3427-2.
- ARAÚJO DE, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. ISBN: 85-7041-448-x.
- ARRUDA, E. F. **Análise de Distúrbios Relacionados com a Qualidade de Energia Elétrica Utilizando a TW**. 2003. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8926**: guia de aplicação de relés para a proteção de transformadores. Rio de Janeiro, 1985.
- BARBOSA, D. **Sistema Híbrido Inteligente para o Monitoramento e Proteção de Transformadores de Potência**. 2010. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- BASTARD, P.; BERTRAND, P.; MEUNIER, M. A Transformer Model for Winding Fault Studies. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 690-699, Apr. 1994.
- BECHARRA, R.; BRANDÃO JR, A. F. Análise de Falhas em Transformadores de Potência e Seus Mecanismos de Ocorrência. In: ENCONTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ, 13., 2009, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: CIGRE, 2009. p. 1-8.
- BENMOUYAL, G.; ZOCHOLL, A. E. O Efeito da Elevada Corrente de Falta e dos Limites das Características Nominais do TC na Proteção de Sobrecorrente. In: ANNUAL WESTERN

PROTECTIVE RELAY CONFERENCE, 29p., 2002, Spokane. **Proceedings...** Spokane: Washington State University, 2002. p. 1-6.

BENTLEY, P. M.; McDONNELL, J. T. E. Wavelet Transforms: an introduction. **Electronics & Communication Engineering Journal**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 175-186, Aug. 1994.

BERNARDES, A. P. **Esquema Completo de Proteção Diferencial de Transformadores para Testes em um Relé Digital**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BO, Z.; WELLER, G.; LOMAS, T. A New Technique for Transformer Protection Bas-ed on Transient Detection. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 15, n. 3, p. 870-875, July 2000.

BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION. **Alternative Transient Program: ATP-EMTP**. Portland, 2010. (Programa de computador)

BRETAS, G. N.; COSTA, A. L. F. **Estabilidade Transitória em Sistemas Eletroenergéticos**. São Paulo: EESC-USP, 2000. ISBN: 85-85205-31-8.

BRONZEADO, H.; YACAMINI, R. Phenomenon of Sympathetic Interaction Between Transformer Caused by Inrush Transients. **IEE Proceeding on Science, Measurement and Technology**, [S. l.], v. 142, n. 4, p. 323-329, July 1995.

BUTLER-PURRY, K. L.; BAGRIYANIK, M. Characterization of Transients in Transformer Using Discrete Wavelets Transforms. **IEEE Transaction on Power Systems**, Piscataway, v. 18, n. 2, p. 648-656, May 2003.

CAMINHA, A. C. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1997. ISBN: 85-212-0136-2.

CARVALHO, R. J. O.; PEREIRA, E. T.; BACHMANN, J. Simulação de Transitórios no Ambiente Simulink Utilizando o Programa Power System Blockset. In: SEMINARIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELETRICA, 5., 2003, Aracaju. **Anais...** Aracaju:SBQEE, 2003. p. 1-6.

CASTILHO, J. E.; PEREIRA JR., A. J. Estudo Comparativo de entre a Análise de Fourier e Análise Wavelet. **FAMAT em Revista**, Uberlândia, n. 5, p. 13-20, Set. 2005.

CASTILLO, A. M. R. e MARTINEZ, E. V. Nuevo Algoritmo de Protección Diferencial de Transformadores Basado en Análisis de Componentes Principales. **Ingenierías**, [S. l.], v. 13, n. 49, Oct./Dic. 2010.

CHEN, X.; VENKATA, S. S. A Three-Phase Three-Winding Core Type Transformer Model for Low-Frequency Transient Studies. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 12, n. 2, p. 775-782, Apr. 1997.

CHERRY, E. C. The Duality Between Interlinked Electric and Magnetic Circuits and the Formation of Transformer Equivalent Circuit. **Proceeding of the Physical Society**, [S. l.], v. 62, n. 2, p. 101-111, Feb. 1949.

CORDRAY, R. E. Percentage Differential Transformer Protection. **Electrical Engineering**, [S. l.], v. 50, n. 5, p. 361-363, May 1931a.

CORDRAY, R. E. Preventing False Operation of Differential Relays. **Electrical World**, [S. l.], p. 160-161, July 1931b.

COSTA DE VERNEY, L. H. **Desempenho da Proteção Diferencial em Transformadores de Potência Perante Condições Especiais de Operação**. 2012. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

DAUBECHIES, I. The Wavelet Transform Time-Frequency Location and Signal Analysis. **IEEE Transaction on Information Theory**, Piscataway, v. 36, n. 5, p. 961-1005, July 1990.

DE LEON, F.; SEMLYEN, A. Completed Transformer Model for Electromagnetic Transients. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 9, n. 1, p. 231-239, Jan. 1994.

DINIZ, P. S. R.; DA SILVA, E. A.; NETTO, S. L. **Processamento Digital de Sinais: projeto e análise de sistemas**. Porto Alegre: Bookman, 2004. ISBN: 85-363-0418-9.

EBNER, A. Transient Inrush Currents Due to Closing Time and Residual Flux Measurement Derivations if Controlled Switching is Used. **Power Systems and High Voltage Laboratory ETH**. Zürich: Annual Report, 2007.

EISSA, M. M. A Novel Digital Directional Transformer Protection Technique Based on Wavelet Packet. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 20, n. 3, p. 1830-1836, July 2005.

EL-AMIN, I. M.; AL-ABBAS, N. H. Saturation of Current Transformer and its Impact on Digital Overcurrent Relays. In: IEEE PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION LATIN AMERICA, 2006, Caracas. **Proceedings...** Caracas: IEEE, 2006. p. 1-6.

FAIZ, J.; LOTFI-FARD, S. A Novel Wavelet-Based Algorithm for Discrimination of Internal Faults From Magnetizing Inrush Currents in Power Transformers. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 21, n. 4, p. 1989-1996, Oct. 2006.

FLACH, E. **Desempenho da Proteção Diferencial de Transformadores em Sistemas de Potência**. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FOLKERS, R. Determine Current Transformer Suitability Using EMTP Models. **Schweitzer Engineering Laboratories**, Pullman: SEL, 1999. Disponível em: <http://www.cigre.nl/media/40338/6096.pdf>. Acesso em: 20 de mar. 2011.

GAOUDA, A. M. et al. Power Quality Detection and Classification Using Wavelet-Multiresolution Signal Decomposition. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 4, n. 4, p. 1469-1476, Oct. 1999.

GEETHANJALI, M.; SLOCHANAL, S. M. R.; BHAVANI, R. A Novel Approach for Power Transformer Protection Based Upon Combined Wavelet Transform and Neural Network (WNN). In: POWER ENGINEERING CONFERENCE, 7., Singapore. **Proceedings...** Singapore: IPEC, 2005. p. 1-6.

GIROD, B.; RABENSTEIN, R.; STENGER, A. **Sinais e Sistemas**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

GOMEZ-MORANTE, M.; NICOLETTI, D. W. A Wavelet-Based Differential Transformer Protection. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 14, n. 4, p. 1351-1358, Oct. 1999.

GRAPS, A. An Introduction to Wavelets. **IEEE Computational Science and Engineering**, Piscataway, v. 2, n. 2, p. 50-61, 1995.

GUZMÁN, A. et al. A Current-Based Solution for Transformer Differential Protection. Part I: Problem Statement. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 21, n. 8, p. 485-491, 2001.

GUZMAN, A. A Current-Based Solution for Transformer Differential Protection. Part II: Relay Description and Evaluation. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 17, n. 4, p. 886-893, Oct. 2002.

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

HARDER, E. L.; MARTER, W. E. Principles and Practices of Relaying in the United States. **Transaction of the American Institute of Electrical Engineers**, [S. l.], v. 67, n. 2, p. 1005-1023, Jan. 1948.

HARRIS, F. J. On the Use of Windows for Harmonics Analysis with the Discrete Fourier Transform. **Proceeding of the IEEE**, Piscataway, v. 66, n. 1, p. 51-83, Jan. 1978.

HEATHCOTE, M. J. **J&P Transformer Book**. [S. l.], 13 ed., Elseiver, 2007. ISBN: 978-0-7506-8164-3.

HE, J. H.; JOU, Z. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 2006, Chongqing. **Proceedings...** Chongqing: IEEE, 2006. p. 1-4.

HOIDALEN, H. K. et al. Implementation and Verification of the Hybrid Transformer Model in ATPDraw. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENT, 2007, Lyon. **Proceedings...** Lyon: IEEE, 2007. Não paginado.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. **Power System Relaying**. 3rd ed. Baldock: Research Studies Press, 2008. ISBN: 978-0-470-05712-4.

IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. **IEEE Std. C37.110™**. Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes. New York: IEEE, 2008, ISBN: 978-0-7381-5375-9.

IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. **IEEE Std. C37.13**. Standard Requirements for Instrument Transformer. New York, IEEE, 2008, ISBN: 978-0-7381-5411-4..

IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. **IEEE Std. C37.91**. Guide for Protecting Power Transformer. New York, IEEE, 2008. ISBN: 978-0-7381-5389-6.

INAGAKI, K. et al. Digital Protection Method for Power Transformer Based on an Equivalent Circuit Composed of Inverse Inductance. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 3, n. 4, p. 1501-1510, Oct. 1988.

JANUARIO, M. **Modelagem de Transformadores em Função da Frequência**. 2007. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

KAIAVATHI, M. S.; REDDY, B. R.; SINGH, B. P. Transformer Fault Diagnostic Using Fuzzy Logic and Neural Network. In: ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENON, 2005, Tennessee. **Proceedings...** Tennessee: IEEE, 2005. p. 486-489.

KASZTENNY, B.; KESZUNOVIC, M. Digital Relay Improve Protection of Large Transformer. **IEEE Computer Application in Power**, Piscataway, v. 11, n. 4, p. 39-45, Oct. 1998.

KEMA, N. V. Transformer Model for High Frequency. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 3, n. 4, p. 1761-1768, Oct. 1988.

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

KEZUNOVIC, M.; FROMER, C. W.; PHILLIPS, F. Experimental Evaluation of EMTP-Based Current Transformer for Protective Relay Transient Study. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 9, n. 1, p. 405-413, Jan. 1994.

KEZUNOVIC, M.; YOUNG, G. Modeling and Simulation of the Power Transformer Faults and Related Protective Relay Behavior. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 44-50, Jan. 2000.

KIM, C. H.; AGGARWAL, R. Wavelet Transform in Power Systems Part 2: examples of application to actual power system transients. **Power Engineering Journal**, Piscataway, v. 15, n. 4, p. 193-202, Aug. 2001.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering: design and practice**. New York: Marcel Dekker, 2005. ISBN: 0-8247-5653-3.

KUMAR, N. P. Identification of Winding Faults in Power Transformer by Low Voltage Impulse Test and Neutral Current Method Using Wavelet Transform Approach. In: ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2005, Nashville. **Proceedings...** Nashville: IEEE, 2005. p. 140-143.

KUMBHAR, G. B.; KULKARNI, S. V. Analysis of Sympathetic Inrush Phenomenon in Transformer Using Coupled Field-Circuit Approach. In: IEEE/PES GENERAL MEETING, 2007, Tampa. **Proceedings...** Tampa: IEEE, 2007. p. 1-6.

KUNAKORN, A. Application of Discrete Wavelet Transform for Transformer Inrush Current Detection in Protective Control Scheme. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON

COMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGIES –ISCIT, 2004, Sapporo. **Proceedings...** Sapporo: IEEE, 2004. p. 871-874.

KUNAKORN, A.; NGAOPITAKKUL, A.; NGAMROO, I. Discrimination Between External Short Circuit and Internal Faults in Transformer Windings Using Discrete Wavelet Transforms. In: INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 2005, Kowloon. **Proceedings...** Kowloon: IEEE, 2005. p. 448-452.

KOLLA, S. R. Digital Protection of Power Transformer Using Artificial Neural Network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCE IN INSTRUMENTATION AND CONTROL, 1995, New York. **Proceedings...** New York: ISA, 1995. p. 141-150.

LATHI, B. P. **Modern Digital and Analog Communication System**. 3rd. ed., New York: Oxford University Press, 1998. ISBN 01-951-1009-9.

LING, P. C. Y.; BASAK, A. Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-Phase Transformer. **IEEE Transaction on Magnetics**, Piscataway, v. 24, n. 6, p. 3217-3222, Nov. 1988.

LING, P. C. Y.; BASAK, A. A New Detection Scheme for Realisation of Magnetising Inrush Current in Transformers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER PROTECTION, 4., 1989, Edinburgh. **Proceedings...** Edinburgh: IEEE, 1989. p. 239-243.

LIU, P. e LIN, X. The Ultra-Saturation Phenomenon of Loaded Transformer Energization and Its Impacts on Differential Protection. **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 1264-1272, Apr. 2005.

LI, Q.; CHAN, D. T. W. Investigation of Transformer Inrush Current Using A Dyadic Wavelet. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY MANAGEMENT AND POWER DELIVERY, 1998, Singapore. **Proceedings...** Singapore: IEEE, 1998. p. 426-429.

LIN, C. E. et al. Investigation of Magnetizing Inrush Current in Transformer. Part I: Numerical Simulation. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 8, n. 1, p. 246-254, Jan. 1993.

MALLAT, D. C. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the wavelet single-phase transformer. **IEEE Transaction on Magnetics**, Piscataway, v. 24, n. 6, p. 3217-3222, Nov. 1988.

MAO, P. L.; AGGARWAL, R. K. A Novel Approach to the Classification of the Transient Phenomena in Power Transformer Using Combined Wavelet Transform and Neural Network. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 16, n. 4, p. 654-660, Oct. 2001.

MAO, P. L.; AGGARWAL, R. K. A Wavelet Transform Based Decision Making Logic Method for Discrimination Between Internal Faults and Inrush Currents in Power Transformer. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 22, n. 6, p. 389-395, Aug. 2000.

MAO, P. L. et al. Identification of Electromagnetic Transients in Power Transformer System Using Artificial Neural Network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER

SYSTEM TECHNOLOGY –POWERCOM, 1998, Beijing. **Proceedings...** Beijing: IEEE, 1998. p. 880-884.

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, Apr. 2005.

MARTI, J. Accurate Modeling of Frequency Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-101, p. 147–155, Jan. 1982.

MATLAB. **The language of technical computing**. [S. l.], The MathWorks, 2012. 1 CD-ROM.

MEGAHED, A. I.; RAMADAN, A.; ELMAHDY, W. Power Transformer Differential Relay Using Wavelet Transform Energies. In: IEEE/PES GENERAL MEETING, 2008, Pennsylvania. **Proceedings...** Pennsylvania: IEEE, 2008. p. 1-6.

MELLO, F. P. de. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Santa Maria: UFSM, 1979.

MISITI, M. et al. **Wavelet Toolbox: User's Guide**. Natick, MA: The Math Works, 1997, 626 p.

MORCHED, A.; MARTI, L.; OTTEVANGERS, J. A High-Frequency Transformer Model for the EMTP. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 8, n. 3, p. 1615-1626, July 1993.

MONSEF, H.; LOTFIFARD, S. Internal Fault Current Identification Based on Wavelet Transform in Power Transformer. **Electric Power System Research**, [S.1.], v. 77, n. 12, p. 1637-1645, Oct. 2007.

MONSETH, I. T.; ROBINSON, P. H. **Relay System: theory and applications**, New York: McGraw Hill, 1935.

MORTAZAVI, H.; KHORASHADI-ZADEH, H. A New Inrush Restraint Algorithm For Transformer Differential Relays Using Wavelet Transform. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY –POWERCOM, 2004, Singapore. **Proceedings...** Singapore: IEEE, 2004. p. 1705-1709.

MURTY, Y. V. V. S.; SMOLINSKI, W. J. A Kalman Filter Based Digital Percentage Differential and Ground Fault Relay for 3-Phase Power Transformer. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 5, n. 3, p. 1299-1308, July 1990.

NGAOPITAKKUL, A.; KUNAKORN, A. Internal Fault Classification in Transformer Winding Using Combination of Discrete Wavelet Transforms and Back-propagation Neural Networks. **International Journal of Control, Automation and Systems**, Berlin: Springer Heidelberg, v. 4, n. 3, p. 365-371, June 2006.

OLIVEIRA, M. O.; BRETAS, A. S. Application of Discrete Wavelet Transform for Differential Protection of Power Transformer. In: IEEE/PES POWERTECH, 2009, Bucharest. **Proceedings...** Bucharest: IEEE, 2009. p. 1-8.

OLIVEIRA, M. O.; BRETAS, A. S. Metodologias Para Proteção Diferencial Digital de Transformadores de Potência: Uma Revisão. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON POWER TRANSFORMER, 6., Foz do Iguaçu. **Proceedings...** Foz do Iguaçu: CIGRÉ, 2010a. Não paginado.

OLIVEIRA, M. O.; BRETAS, A. S. Modelagem de Transformadores para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON POWER TRANSFORMER, 6., Foz do Iguaçu. **Proceedings...** Foz do Iguaçu: CIGRÉ, 2010b. Não paginado.

OLIVEIRA, M. O. et al. Adaptive Differential Protection for Power Transformer Based on Transient Signal Analysis. In: IEEE/PES GENERAL MEETING, 2012, San Diego. **Proceedings...** San Diego: IEEE, 2012a. p. 1-7.

OLIVEIRA, M. O. et al. Principales Características de la Corriente de Inrush en Transformadores. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INNOVATION AND TECHNOLOGY, 3., 2012, Cuzco. **Proceedings ...** Cuzco: IIITEC, 2012b. p. 1-7.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing**, 2nd ed., Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 1998.

OU, Z. J. et al. A Power Transformer Transient Based Protection Using Wavelet De-Noising. In: IEEE/PES POWER AFRICA CONFERENCE AND AXPOSITION, 2007, Johannesburg. **Proceedings...** Johannesburg: IEEE, 2007. p. 1-7.

ÖZGÖNENEL, O.; ÖNBILGIN, G.; KOCAMAN, C. Transformer Protection Using the Wavelet Transform. **Turk Journal Electrical Engineering**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 119-135, July 2005.

ÖZGÖNENEL, O. Protection of Power Transformer By Using Continuous Wavelet Transform. In: IEEE MEDITERRANEAN ELECTROTECHNICAL CONFERENCE, 2006, Málaga. **Proceedings...** Málaga: IEEE, 2006. p. 1106-1109.

PAITHANKAR, Y. G. **Transmission Network Protection: theory and practice**. New York: Marcel Dekker, 1998.

PEREZ, L. G. et al. Training an Artificial Neural Network to Discriminate Between Magnetizing Inrush and Internal Faults. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 9, n. 1, p. 434-441, Jan. 1994.

PENA, M. C. M. **Falhas em Transformadores de Potência: uma contribuição para análise, definições, causas e soluções**. 2003. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

PILHER, J.; GREAR, B.; DOLINAR, D. Improved Operation of Power Transformer Protection Using Artificial Neural Network. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 12, n. 3, p. 1128-1136, July 1997.

POVH, D. et al. Calculation of Transient Phenomena. In: ATHENS POWER TECH CONFERENCE, 1993, Athens. **Proceedings...** Athens: IEEE, 1993. p. 738-743.

PROESCHOLDT, H. T. **Estudo dos Efeitos das Correntes de Magnetização (Inrush) de um Transformador sobre um Gerador Síncrono**. 2006. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

RAHMAN, M. A.; JEYASURYA, A. A State-of-the-art Review of Transformer Protection Algorithms. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 3, n. 2, p. 534-544, Apr. 1988.

RIES, W. **Transformadores: fundamentos para o projeto e cálculo**. Porto Alegre: PUCRS, 2007. ISBN: 987-85-7430-645-2.

RIBEIRO, C. F. **Correntes Transitórias de Energização dos Transformadores**. Curso Especial de Distribuição de Energia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1982.

ROBERTSON, D. C. et al. Wavelet and Electromagnetic Power System Transients. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 11, n. 2, p. 1050-1058, Apr. 1996.

SALEH, S. A.; RAHMAN, M. A. Real-Time Testing of a WPT-Based Protection Algorithm for Three-Phase Power Transformer. **IEEE Transaction on Industry Applications**, Piscataway, v. 41, n. 4, p. 2430-2436, Oct. 2004.

SALEH, S. A.; RAHMAN, M. A. Modeling and Protection of a Three-Phase Power Transformer Using Wavelets Packet Transform. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 1273-1282, Apr. 2005.

SANTOS, C. I. dos. **Modelagem do Relé de Proteção Diferencial Tipo BDD15B-GE**. 2006, 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

SANTOSO, S. et al. Power Quality Assessment Via Wavelet Transform Analysis. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 11, n. 2, p. 324-930, Apr. 1996.

SACHDEV, M. S.; SIDHU, T. S.; WOOD, H. C. A Digital Relaying Algorithm for Detecting Transformer Winding Faults. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 4, n. 3, p. 1638-1648, July 1989.

SEDIGHI, A. R.; HAGHIFAM, M. Detection of Inrush Current in Distribution Transformer Using Wavelet Transform. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 27, n. 6, p. 361-370, July 2005.

SENGÜL, M. et al. Case Study of Sympathetic Interaction Between Transformer Caused by Inrush Current. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TRANSIENT, 2005, Montréal. **Proceedings...** Montréal: IEEE, 2005. p. 1-7.

STRINGER, N. T. et al. Testing and Performance of Transformer Differential Relays. **IEEE Industry Application Magazine**, Piscataway, v. 3, n. 4, p. 36-42, July/Aug. 1997.

STRINGER, N. T.; DALKE, G. Ground-Differential Protection Revisited. **IEEE Industry Applications Magazine**, Piscataway, v. 6, n. 2, p. 53-58, Mar./Apr. 2000.

- SYKES, J. A. A New Technique for High Speed Transformer Fault Protection Suitable for Digital Computer Implementation. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 1972, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: IEEE, 1972. p. 1-7.
- SIDHU, T. S.; SACHDEV, M. S. On-Line Identification of Magnetizing Inrush and Internal Faults in Three-Phase Transformers. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 7, n. 4, p. 1885-1891, Oct. 1992.
- THORP, J. S.; PHADKE, A. G. A Microprocessor-Based, Voltage-Restrained, Three-Phase Transformer Differential Relay, In: SOUTHEASTERN SYMPOSIUM ON SYSTEM THEORY, 1982, Blacksburg. **Proceedings...** Blacksburg: IEEE, 1982. p. 312-316.
- TRIPATHY, M.; MAHESHWARI, R. P.; VERMA, H. K. Particle Swarm Optimization Based Probabilistic Neural Network for Power Transformer Protection. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SERVICE COMPUTING, 2006, Chicago. **Proceedings...** Chicago: IEEE, 2006. p. 568-573.
- TRIPATHY, M.; MAHESHWARI, R. P.; VERMA H. K. Radial Basis Probabilistic Neural Network for Differential Protection of Power Transformer. **IET Generation, Transmission & Distribution**, London: IET Research Journal, v. 2, n. 1, p. 43-52, Jan. 2008.
- VAESSEN, P. T. M. Transformer Model for High Frequencies. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 3, n. 4, p. 1761-1768, Oct. 1988.
- VALSAN, S. P.; SWARUP, K. S. Wavelet Based Transformer Protection Using High Frequency Power Directional Signals. **Electric Power System Research**, Amsterdam: Elsevier, v. 78, n. 4, p. 547-558, Apr. 2008.
- VAZQUEZ, E. et al. Transformer Differential Protection Using Principal Component Analysis. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 23, n. 1, p. 67-72, Jan. 2008.
- WANG, H.; BUTLER, K. L. Finite Elements Analysis of Internal Winding Faults in Distribution Transformer. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 16, n. 3, p. 422-428, July 2001.
- WANG, Y. et al. Analysis on the Influencing Factors of Transformer Sympathetic Inrush Current. In: IEEE/PES GENERAL MEETING, 2008, Pittsburgh. **Proceedings...** Pittsburgh: IEEE, 2008. p. 1-8.
- WANG, M.; VANDERMAAR, A. J.; SRIVASTAVA, K. D. Review of Condition Assessment of Power Transformer in Service. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Piscataway, v. 18, n. 6, p. 12-25, Nov./Dec. 2002.
- WATSON, N.; ARRILLAGA, J. **Power System Electromagnetic Transient Simulation**. London: IET, 2007. ISBN: 0-85296-106-5.
- WISZNIEWSKI, A.; KASZTENNY, B. A Multi-Criteria Differential Transformer Relay Based on Fuzzy Logic. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 10, n. 4, p. 1786-1792, Oct. 1995.

XIONG, Z.; RAMCHANDRAN, K. **Wavelet Image Compression**. San Diego: Academic Press, 2000.

YANG, Z. A New Technique for Power Transformer Protection Using Discrete Dyadic Wavelets Transform. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 7., 2001, Amsterdam. **Proceedings...** Amsterdam: IEEE, 2001. p. 383-386.

YOUSSEF, O. A. S. Applications of Fuzzy-logic-wavelets-based techniques for Transformer Inrush Current Identification and Power Systems Faults Classification. In: IEEE/PES POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITIONS, 2004, New York. **Proceedings...** New York: IEEE, 2004. p. 553-559.

YOUSSEF, O. A. S. A Wavelet-Based Technique for Discrimination Between Faults and Magnetizing Inrush Currents in Transformers. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 18, n. 1, p. 170-176, Jan. 2003.

ZAMAN, M. A.; HOQUE, M. A.; RAHMAN, M. A. On-line Implementation of the Artificial Neural Network Based Protection for Power Transformer. In: NECEC CONFERENCE, 1996, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: IEEE, 1996. p. 1-7.

ZCERNORUCKI, M. V., **Representação de Transformadores em Estudos de Transitórios Eletromagnéticos**. 2007. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade da São Paulo, São Paulo, 2007.

ZIEGLER, G. **Numerical Differential Protection: principles and applications**. 2nd ed., Germany: Siemens Publicist Publishing, 2012, ISBN: 978-3-89578-351-7.

## APÊNDICE – PUBLICAÇÕES ASSOCIADAS À PRESENTE PESQUISA

### Publicações em Congressos

OLIVEIRA, M. O.; CABRAL, R. J.; BRETAS, A. S. Optimización de um Algoritmo de Protección Diferencial de Transformadores Mediante Análisis de Varianza. In: CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL, 3p., 2009, Oberá. **Anais...** Oberá: COINI, 2009. p. 1-19.

OLIVEIRA, M. O.; BRETAS, A. S. Application of Discrete Wavelet Transform for Differential Protection of Power Transformer. In: IEEE/PES POWERTECH, 2009, Bucharest. **Proceedings...** Bucharest: IEEE, 2009. p. 1-8.

OLIVEIRA, M. O.; BRETAS, A. S.; FERREIRA, G. D. Differential Protection on Three-Phase Transformer Based on Transient Signal Analysis. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 2010, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: CIDEL, 2010. p. 1-6.

OLIVEIRA, M. O.; BRETAS, A. S. Modelagem de Transformadores para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON POWER TRANSFORMER, 6p., 2010, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** Foz do Iguaçu: CIGRÉ, 2010. Não paginado.

OLIVEIRA, M. O.; BRETAS, A. S. Metodologia para Proteção Diferencial de Transformadores de Potência: Revisão do Estado da Arte. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON POWER TRANSFORMER, 6p., 2010, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** Foz do Iguaçu: CIGRÉ, 2010. Não paginado.

OLIVEIRA, M. O.; BRETAS, A. S. Nova Metodologia para Identificação de Correntes de Inrush em Transformadores de Potência. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON POWER TRANSFORMER, 6p., 2010, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** Foz do Iguaçu: CIGRÉ, 2010. Não paginado.

OLIVEIRA, M. O.; BRETAS, A. S.; PERRONE, O. E.; REVERSAT, J. H.; MUÑOZ, H. E.; PAUCAR, R. O. Principales Características de la Corriente de Inrush en Transformadores. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INNOVATION AND TECHNOLOGY, 2012, Cuzco. **Proceedings...** Cuzco: ISIT, 2012. p. 1-7.

TOLEDO, E.; OLIVEIRA, M. O.; PERRONE, O. E.; REVERSAT, J. H.; MUÑOZ, H. E.; PAUCAR, R. O. Análisis de Ferrorresonancia en Transformadores de Tensión Inductivos para Uso Metrológico. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INNOVATION AND TECHNOLOGY, 2012, Cuzco. **Proceedings...** Cuzco: ISIT, 2012. p. 1-5.

OLIVEIRA, M. O.; FERREIRA, G. D.; GARCIA, F. H.; BRETAS, A. S.; PERRONE, O. E.; REVERSAT, J. H. Adaptive Differential Protection for Power Transformer Based on Transient Signal Analysis. In: IEEE/PES GENERAL MEETING, 2012, San Diego. **Proceedings ...** San Diego: IEEE, 2012. p. 1-7.

### **Capítulo de Livro**

OLIVEIRA, M. O.; BRETAS, A. S. Application of Discrete Wavelet Transform for Differential Protection of Power Transformer. HANNU, Okkonen. **Discrete Wavelet Transform –Biomedical Application**. Kroacia: InTech, 2010. vol. 1, cap. 18, p. 349-366.