

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 DE TRANSFORMADORES  
TRIFÁSICOS UTILIZANDO A TRANSFORMADA  
WAVELET**

Porto Alegre

2009

**MARIO ORLANDO OLIVEIRA**

**PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES  
TRIFÁSICOS UTILIZANDO A TRANSFORMADA  
WAVELET**

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Energia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre

2009

MARIO ORLANDO OLIVEIRA

**PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES  
TRIFÁSICOS UTILIZANDO A TRANSFORMADA  
WAVELET**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre 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 Polytechnic Institute and State  
University – Blacksburg, Estados Unidos.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza, UNIFEI  
Doutor pela University Of Waterloo Canadá – Ontário, Canadá

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS  
Doutor pela Chalmers University Of Technology, Göteborg, Suécia

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS  
Doutor pela Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre, Março de 2009.

*Porque a sabedoria serve de defesa, como de defesa serve o dinheiro;  
mas a excelência da sabedoria é que ela preserva a vida de quem a possui.*

Eclesiastes 7, 12.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha família, pelo amor e apoio em todos os momentos da minha vida e, especialmente, à minha esposa Karina por toda paciência, dedicação e amor incondicional.

## **AGRADECIMENTOS**

Sou muito grato ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e aos seus professores, pela oportunidade de realização deste trabalho de pesquisa.

Ao Prof. Arturo Suman Bretas meu orientador, professor e, principalmente, meu amigo, a quem agradeço todo o apoio, dedicação, confiança e ensino recebido neste ótimo período de trabalho que tivemos juntos.

Não poderia deixar de agradecer o companheirismo de todos os colegas que fiz durante os dois anos de mestrado, especialmente aos colegas do LASEP.

Um agradecimento muito especial aos meus amigos Karen Rezende Caino de Oliveira e Rodrigo Hartstein Salim pelo apoio, ajuda nos trabalhos e principalmente pela sincera amizade, fato que tornou agradável e inesquecível o período de convivência que tivemos em Porto Alegre.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo apoio financeiro fornecido através da bolsa de mestrado.

Aos meus pais, Andrés e Erica, pelo apoio e suporte dado em toda a minha vida, pelo amor, dedicação e confiança depositada em mim e, por me ensinarem e demonstrarem que as coisas mais valiosas deste mundo o dinheiro não pode comprar.

À minha esposa Karina, amor da minha vida, pelo seu amor, presença, compreensão e amizade ao longo destes anos.

A todas as demais pessoas que, direta ou indiretamente, ajudaram e tornaram possível a realização deste trabalho.

## RESUMO

A qualidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores são fatores muito importantes quando da avaliação da eficiência de um sistema elétrico de potência. Nesse contexto, os transformadores são equipamentos muito importantes e demandam especial atenção quando do projeto do esquema de proteção. Apesar do crescente desenvolvimento das metodologias de proteção de transformadores trifásicos, alguns aspectos ainda não foram totalmente solucionados. Um desses diz respeito à proteção diferencial de transformadores de potência, a qual apresenta vários problemas na discriminação de faltas internas ao transformador. A geração de correntes diferenciais provocada por fenômenos transitórios, como a energização do transformador, produz a incorreta operação do relé, ocasionando uma queda na eficiência do esquema de proteção diferencial. Assim sendo, o presente trabalho apresenta uma nova metodologia de proteção diferencial de transformadores trifásicos, a qual utiliza a transformada wavelet para extrair os sinais transitórios dominantes induzidos pelas faltas internas. A transformada wavelet é uma eficiente ferramenta utilizada no estudo de sinais não-estacionários e de rápida transição. De forma a atender os principais problemas do esquema convencional de proteção, a transformada wavelet discreta é utilizada para decompor os sinais de corrente diferencial em várias faixas de frequências. Após essa decomposição, a variação de energia espectral dos coeficientes de detalhe wavelet é analisada pelo algoritmo proposto, e assim uma discriminação entre faltas internas e correntes de magnetização, ou correntes *inrush*, é feita. Usando um modelo elaborado de um sistema elétrico de transmissão são efetuadas rigorosas simulações computacionais para avaliar o desempenho do algoritmo proposto. Os resultados obtidos nessas simulações mostram que a metodologia de proteção diferencial de transformadores trifásicos baseada na variação de energia espectral dos coeficientes wavelets apresenta um ótimo desempenho quando comparada com a metodologia de proteção convencional.

**Palavras-chaves:** Transformador de potência, proteção diferencial, transformada wavelet, análise de fenômenos transitórios.

## ABSTRACT

Power supply quality and continuity are very important aspect when assessing the efficiency of an electric power system. In this context, the transformers are key equipments that require special attention during the protection scheme design. Despite the increasing development of methodologies for three-phase transformers protection, some aspects have not yet been fully studied. One of these aspects concerns to the differential protection of power transformers, which presents several restrictions regarding the characterization of internal faults. The observation of differential currents caused by transient phenomena such as transformer energization, produces an incorrect operation of protective relaying, causing a drop in the protection scheme efficiency. Therefore, this work presents a new methodology for differential protection of three-phase transformers using the wavelet transform to extract the transient signals induced by the dominant internal faults. The wavelet transform is an efficient tool in the study of non-stationary signals with fast transients. In order to overcome the main problems of the traditional protection scheme, the discrete wavelet transform is used to decompose the differential current signals into several bands of frequencies. After this decomposition, the spectral energy variation of the wavelet detail coefficients is analyzed by the proposed algorithm and, thus, classification between internal faults, external faults and *inrush* currents is performed. Using a transmission system model, accurate simulations are performed to evaluate the computational performance of the proposed protection algorithm. The results obtained in these simulations show that the proposed methodology has a great performance when compared with traditional protection philosophies.

**Keywords:** Power transformer, differential protection, wavelet transform, transient phenomenon analysis.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>14</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>15</b>
<b>LISTA DE SIMBOLOS.....</b>	<b>17</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1 Motivação do Trabalho .....	20
1.2 Objetivos.....	20
1.3 Estrutura do Trabalho .....	21
<b>2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DO TRANSFORMADOR.....</b>	<b>22</b>
2.1 Introdução .....	22
2.2 Proteção de Transformadores .....	22
2.3 A Proteção Diferencial .....	24
2.3.1 O Relé Diferencial Percentual .....	25
2.3.2 Característica de Operação do Relé Percentual.....	26
2.4 Correntes Diferenciais Indesejadas .....	27
2.4.1 Correntes de Magnetização Durante a Energização do Transformador (Correntes de <i>Inrush</i> ).....	27
2.4.2 Saturação dos TCs .....	29
2.4.3 Sobre-excitação do Transformador .....	29
2.4.4 Remoção de Faltas Próximas ao Transformador.....	30
2.4.5 Rejeição de Carga.....	30
2.4.6 Diferenças nas Características dos TCs.....	31
2.5 Resumo .....	31
<b>3 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>32</b>
3.1 Introdução .....	32
3.2 Proteção Diferencial Digital de Transformadores.....	32
3.3 Proteção Diferencial de Transformadores Utilizando a TW.....	34
3.4 Proteção Diferencial de Transformadores Utilizando a Combinação de Técnicas de Análise.....	39
3.5 Resumo .....	40

<b>4</b>	<b>MODELAGEM DE TRANSFORMADORES</b> .....	41
<b>4.1</b>	<b>Introdução</b> .....	41
<b>4.2</b>	<b>Principais Características dos Transformadores</b> .....	41
4.2.1	Considerações para a Modelagem do Transformador .....	42
<b>4.3</b>	<b>Faixa de Frequência dos Fenômenos Transitórios</b> .....	44
<b>4.4</b>	<b>Critérios Utilizados Para a Classificação dos Modelos</b> .....	45
4.4.1	Critérios de Modelagem Baseados em Princípios Físicos.....	45
4.4.2	Outros Critérios de Classificação Utilizados.....	46
<b>4.5</b>	<b>Modelagem em Função da Faixa de Frequência</b> .....	47
4.5.1	Modelagem do Transformador para Baixas e Médias Frequências .....	48
4.5.2	Modelagem do Transformador para Altas Frequências .....	52
<b>4.6</b>	<b>Modelagem em Função do Tipo de Representação</b> .....	61
4.6.1	Modelagem do Núcleo de Ferro .....	61
4.6.2	Modelagem Linear e Não-Linear do Transformador .....	64
<b>4.7</b>	<b>Resumo</b> .....	67
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA DE PROTEÇÃO PROPOSTA</b> .....	68
<b>5.1</b>	<b>Introdução</b> .....	68
<b>5.2</b>	<b>Abordagem Utilizada no Desenvolvimento do Trabalho</b> .....	68
5.2.1	Visão Geral da Transformada Wavelet (TW).....	69
5.2.2	Construção da TW .....	71
<b>5.3</b>	<b>Projeto do Algoritmo de Proteção</b> .....	73
5.3.1	Fundamentação Teórica da Metodologia Proposta .....	74
5.3.2	Metodologia de Detecção e Discriminação dos Distúrbios .....	75
<b>5.4</b>	<b>Construção Numérica do Algoritmo</b> .....	79
5.4.1	<i>Software</i> para Simulação dos Distúrbios.....	79
5.4.2	Descrição da Arquitetura da Interface Gráfica .....	80
<b>5.5</b>	<b>Resumo</b> .....	84
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO E RESULTADOS</b> .....	85
<b>6.1</b>	<b>Introdução</b> .....	85
<b>6.2</b>	<b>Sistema Elétrico Estudado</b> .....	85
6.2.1	Elementos do Sistema Elétrico .....	86
<b>6.3</b>	<b>Simulações Realizadas</b> .....	90
6.3.1	Representação dos Fenômenos Estudados .....	90
6.3.2	Número de Casos Estudados .....	97
<b>6.4</b>	<b>Resultados Obtidos</b> .....	100
6.4.1	Casos Analisados.....	100
6.4.2	Desempenho do Algoritmo Perante Variação da Resistência de Falta .....	100
6.4.3	Desempenho do Algoritmo Perante Variação da Carga.....	102
6.4.4	Desempenho do Algoritmo Perante Variação da Wavelet Mãe e Comparação com a Técnica Convencional de Proteção Diferencial.....	104
<b>6.5</b>	<b>Resumo</b> .....	106
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	107
<b>7.1</b>	<b>Sugestões Para Trabalhos Futuros</b> .....	109
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	110

<b>ANEXO A</b>	<b>CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO (CORRENTE <i>INRUSH</i>).....</b>	<b>119</b>
<b>A.1</b>	<b>Corrente de Magnetização nos Transformadores .....</b>	<b>119</b>
<b>A.2</b>	<b>Fluxo Residual (<math>\Phi_R</math>).....</b>	<b>119</b>
<b>A.3</b>	<b>Geração da Corrente <i>Inrush</i>.....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>INTRODUÇÃO A TRANSFORMADA WAVELET (TW) .....</b>	<b>123</b>
<b>B.1</b>	<b>Comparação com a Transformada de Fourier .....</b>	<b>123</b>
B.1.1	Transformada Discreta de Fourier .....	124
B.1.2	Transformada Discreta de Fourier com Janelamento .....	125
<b>B.2</b>	<b>Transformada Wavelet .....</b>	<b>126</b>
B.2.1	Transformada Wavelet Contínua.....	126
B.2.2	Transformada Wavelet Discreta .....	127
B.2.3	Transformada Wavelet Diádica .....	128
B.2.4	Energia e Potência de Sinais Discretos .....	129

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1:	Esquema de proteção diferencial de um transformador monofásico.....	24
Figura 2.2:	Esquema funcional do relé diferencial percentual.....	25
Figura 2.3:	Característica de atuação da proteção diferencial percentual.....	26
Figura 2.4:	Relação esquemática entre a corrente nominal $I_n$ e a corrente <i>inrush</i> $I_r$ ....	28
Figura 4.1:	Adição das capacitâncias no transformador (ADIELSON, 1981).....	43
Figura 4.2:	Modelo BCTRAN com núcleo magnético anexado externamente .....	49
Figura 4.3:	Modelo incluindo a saturação (modelo STC no ATP/EMTP) .....	50
Figura 4.4:	Modelo do transformador baseado no princípio da dualidade .....	51
Figura 4.5:	Representação do transformador através de um quadripolo.....	53
Figura 4.6:	Configuração tipo caixa preta proposta por Kerma et al., (1998) .....	54
Figura 4.7:	Modelo modal do transformador de quatro terminais da Figura 4.6.....	55
Figura 4.8:	Diagrama unifilar de um circuito $\pi$ equivalente multi-terminal.....	56
Figura 4.9:	Segmento genérico entre duas espíras de um enrolamento contínuo .....	57
Figura 4.10:	Modelo detalhado proposto por Rahimpour et al., (2003) .....	58
Figura 4.11:	Modelo do transformador proposto por Noda et al., (2002).....	58
Figura 4.12:	Modelo simplificado proposto por Chimklai et al., (1995).....	59
Figura 4.13:	Curvas de magnetização e laços de histerese genéricos.....	61
Figura 4.14:	Modelo do núcleo de ferro sem histerese .....	62
Figura 4.15:	Modelo do núcleo de ferro com saturação e perdas .....	62
Figura 4.16:	Circuito equivalente serie de Foster para enrolamentos.....	63
Figura 4.17:	Circuito equivalente de Cauer para o núcleo de ferro .....	64
Figura 4.18:	Modelo linear do transformador proposto por Greene et al., (1988).....	64
Figura 4.19:	Modelo não-linear 1 (GREENE et al., 1988) .....	66
Figura 4.20:	Modelo não-linear 2(GREENE et al., 1988) .....	66
Figura 4.21:	Laço de histerese para a modelagem no tempo (GREENE et al., 1988)...	66
Figura 4.22:	Modelo não-linear no domínio tempo (GREENE et al.,1988).....	67
Figura 5.1:	Diagrama de filtragem do sinal (decomposição).....	73
Figura 5.2:	Esquema simplificado da metodologia de proteção proposta .....	74
Figura 5.3:	Fluxograma do algoritmo de proteção proposto.....	76
Figura 5.4:	Exemplificação gráfica do cálculo do índice $I_{RELÉ}$ em cada janela .....	79
Figura 5.5:	Principais grupos de dados da interface gráfica do algoritmo.....	80
Figura 5.6:	Blocos de dados necessários para a simulação e análise dos distúrbios....	81
Figura 5.7:	Bloco 1º e 2º utilizado para a seleção do tipo de falta a simular pelo <i>software</i> ATP/EMTP .....	82
Figura 5.8:	Bloco 3º para seleção das características da análise wavelet .....	83
Figura 5.9:	Bloco 4º de execução do algoritmo e visualização de resultados .....	84
Figura 6.1:	Esquema representativo do sistema elétrico utilizado no ATP/EMTP.....	85

Figura 6.2:	Modelo de fonte de tensão constante utilizado no circuito da Figura 6.1	86
Figura 6.3:	Curva de saturação do transformador de potência de 35 MVA	87
Figura 6.4:	Modelo STC (Transformador Monofásico Saturável) do ATP/EMTP	88
Figura 6.5:	Detalhe das conexões dos enrolamentos monofásicos	88
Figura 6.6:	Curva de saturação dos transformadores de corrente 1200/5 e 200/5	89
Figura 6.7:	Torre utilizada na modelagem do sistema de transmissão de 138 kV	90
Figura 6.8:	Energização do transformador em 0.1 segundos nas Fases A, B e C	91
Figura 6.9:	Energização do transformador em 0.1 segundos com presença de falta interna entre as Fases A e a Terra com uma $R_f = 10 \Omega$	92
Figura 6.10:	Condição de falta interna bifásica entre as Fases A, B e Terra com resistência de falta de: $R_{fA} = 10 \Omega$ , $R_{fB} = 100 \Omega$	93
Figura 6.11:	Condição de falta externa no lado secundário do transformador entre as Fases A e C com uma $R_f = 0.1 \Omega$	94
Figura 6.12:	Condição de falta Fase-Terra entre o terminal secundário do transformador e o TC através de uma $R_f = 10 \Omega$	95
Figura 6.13:	Condição de remoção de falta externa ao transformador em 0.15 seg.	96
Figura 6.14:	Variação da precisão do algoritmo em função da resistência de falta	102
Figura 6.15:	Variação da precisão do algoritmo em função da carga conectada	104
Figura 6.16:	Eficiência das wavelets mãe testadas e comparação com a análise tradicional de Fourier	106
1.A	Representação esquemática do laço de histerese do núcleo de um transformador de potência	120
2.A	Corrente de magnetização $I_e$ quando a energização ocorre num tempo onde a onda de tensão corresponde ao fluxo residual no núcleo	121
3.A	Corrente de magnetização $I_e$ quando a energização ocorre num tempo onde o fluxo encontra-se no seu valor máximo	122
1.B	Efeito do fator de escala numa função senóide	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Origem dos transitórios e suas frequências associadas .....	44
Tabela 6.1: Parâmetros utilizados na modelagem do transformador de potência .....	87
Tabela 6.2: Parâmetros utilizados na modelagem da linha de transmissão.....	90
Tabela 6.3: Cargas utilizadas nas simulações no ATP/EMTP .....	90
Tabela 6.4: Resumo dos casos teste para energização do transformador de potência...	97
Tabela 6.5: Casos teste de faltas internas ao transformador.....	98
Tabela 6.6: Resumo de casos teste de faltas ocorrendo entre o transformador e o TC ..	98
Tabela 6.7: Casos teste de energização do transformador com presença de falta interna .....	99
Tabela 6.8: Casos teste de faltas externas ao transformador .....	99
Tabela 6.9: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta considerando uma $R_f = 0.00 \Omega$ .....	101
Tabela 6.10: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta considerando uma $R_f = 0.01 \Omega$ .....	101
Tabela 6.11: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta considerando uma $R_f = 10 \Omega$ .....	101
Tabela 6.12: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta considerando uma $R_f = 100 \Omega$ .....	102
Tabela 6.13: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta com uma carga de 3 MVA .....	103
Tabela 6.14: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta com uma carga de 10 MVA .....	103
Tabela 6.15: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta com uma carga de 25 MVA .....	103
Tabela 6.16: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial considerando a wavelet mãe tipo Daubechies .....	104
Tabela 6.17: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial considerando a wavelet mãe tipo Haar .....	105
Tabela 6.18: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial considerando a wavelet mãe tipo Symlet .....	105
Tabela 6.19: Desempenho comparativo das wavelets mães testadas .....	105

## LISTA DE ABREVIATURAS

ACP	Análise de componentes principais
AMR	Análise Multi-Resolução
AT	Alta tensão
ATP	Programa alternativo de transitórios – <i>Alternative Transients Program</i>
BPN	<i>Back Propagation Algorithm</i>
DC	Corrente contínua – <i>Direct Current</i>
DFT	Transformada discreta de fourier ( <i>Discrete Fourier Transform</i> )
DFS	Serie discreta de Fourier ( <i>Discrete Fourier Series</i> )
DSP	Processador digital de sinais ( <i>Digital Signal Processor</i> )
EF	Elementos finitos
EMTP	Software de transitórios eletromagnéticos – <i>Electromagnetic Transients Program</i>
FTT	Técnica de análise tradicional de Fourier – <i>Fourier Traditional Technique</i>
IFD	Detector de falhas internas ( <i>Internal Faults Detector</i> )
LF	Lógica fuzzy
MDL	Descrição de comprimento mínimo
RNA	Redes neurais artificiais
SE	Energia espectral – <i>Spectral Energy</i>
SEP	Sistemas elétricos de potência
STC	Transformador de componente saturável – <i>Saturable Transformer Component</i>
$T_{3\phi}$	Transformador trifásico
TCS	Transformadores de corrente
TF	Transformada de Fourier
TRF	Transformada rápida de Fourier
TW	Transformada wavelet

TWC Transformada wavelet contínua  
TWD Transformada wavelet discreta  
TWDI Transformada wavelet diádica  
TWSD Transformada wavelet semi-discreta  
TWP Transformada wavelet packet  
WDFT Transformada de Fourier com Janelamento (*Windowed Discrete Fourier Transform*)

## LISTA DE SIMBOLOS

$N_1$	Número de espiras do enrolamento primário do transformador de potência
$N_2$	Número de espiras do enrolamento secundário do transformador de potência
$i_{1S}$	Corrente no enrolamento secundário do TC conectado no primário do transformador de potência.
$i_{2S}$	Corrente no enrolamento secundário do TC conectado no secundário do transformador de potência.
$i_{1P}$	Corrente no enrolamento primário do TC conectado no primário do transformador de potência.
$i_{2P}$	Corrente no enrolamento primário do TC conectado no secundário do transformador de potência.
$i_r$	Corrente de restrição do relé
$i_{op}$	Corrente de operação do relé
$k$	Característica diferencial percentual
$i_d$	Corrente diferencial do relé
$I_n$	Corrente nominal do transformador de potência
$I_r$	Corrente Inrush
Y- $\Delta$	Conexão estrela- triângulo
$C_a$	Capacitância entre o enrolamento próximo ao núcleo e o núcleo.
$C_b$	Capacitância entre enrolamentos
$C_c$	Capacitância de cada enrolamento
Hz	Hertz
$R_1$	Resistência do enrolamento primário do transformador de potência
$R_2$	Resistência do enrolamento secundário do transformador de potência
$L_1$	Indutância do enrolamento primário do transformador de potência
$L_2$	Indutância do enrolamento secundário do transformador de potência
$L_m$	Indutância de magnetização
$R_m$	Resistência de magnetização

$V_1$	Tensão no enrolamento primário do transformador de potência
$V_2$	Tensão no enrolamento secundário do transformador de potência
$Y$	matriz de admitância nodal
$B$	Fluxo magnético
$H$	Intensidade de campo magnético
$\lambda_{\max}$	Fluxo máximo concatenado
$\varepsilon_{\omega}$	Energia de espectro de detalhe
$I_a$	Corrente de ativação do algoritmo proposto
$I_{RELE}$	Corrente de discriminação do algoritmo proposto
$n$	Número mínimo de janelas de análise
$k_2$	valor limiar para atuação do relé ( <i>Threshold</i> )
$\Omega$	Símbolo da resistência elétrica em ohm
$R_f$	Resistência de falta
km	Kilo-metro
$S_1$	Chave para simulação de energização do transformador
$S_2$	Chave para simulação de eliminação de faltas externas próximas ao transformador.
$S_3$	Chave para simulação de falta externa ao transformador
$S_4$	Chave para simulação de falta interna ao transformador.
$\phi_n$	Fluxo magnético no núcleo do transformador
$\phi_R$	Fluxo magnético residual
$\phi_P$	Fluxo magnético permanente
$\phi_T$	Fluxo magnético transitório
$\phi_{\max}$	Fluxo magnético máximo
$\tau$	Constante de tempo de amortecimento do sistema

# 1 INTRODUÇÃO

A configuração dos Sistemas Elétricos de Potência (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 dos SEP 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 de Potência seja, além de necessário, muito importante para resguardar a estabilidade e qualidade da energia fornecida.

Nesse contexto, a proteção dos Transformadores de Potência tornou-se uma tarefa não muito fácil, dado que se deve achar uma solução de compromisso técnico-econômico que considere os investimentos, os custos operacionais e a eficiência do esquema de proteção adotado (ALMEIDA et al., 2005). É assim que a Proteção Diferencial surge como uma alternativa técnica e economicamente viável para a proteção do transformador quando da ocorrência de faltas internas. No entanto, mesmo sendo um dos esquemas convencionais de proteção de transformadores (ANDERSON, 1999), apresenta ineficiências operacionais que fazem com que esse tipo de proteção deva estar em constante evolução. A maior parte das ineficiências encontradas no esquema de proteção diferencial é produzida por transitórios elétricos, que geralmente são gerados por manobras operacionais nos SEP. Dentre essas manobras, a energização do transformador é a fonte principal de correntes diferenciais transitórias que provocam a operação incorreta dos relés de proteção.

O surgimento da tecnologia digital permitiu o desenvolvimento de relés mais rápidos e confiáveis, substituindo os circuitos analógicos existentes. Assim, as grandezas monitoradas são filtradas, convertidas para modo digital e tratadas dessa forma até o final do processo. Sensibilidade, seletividade, velocidade e confiabilidade são termos comumente usados para descrever as características funcionais dos relés. No entanto, a aplicação conjunta desses termos nem sempre é possível, devido, por exemplo, à velocidade de operação dos relés que deve ser controlada por razões de coordenação entre as velocidades de operação de outros relés em cascata. A sensibilidade do esquema de proteção não depende só do próprio relé, mas, também do disjuntor associado a este e, portanto, relés rápidos devem ser associados a disjuntores rápidos, de modo a reduzir o tempo total de operação (CAMINHA, 1997).

Muito tem sido feito nos últimos anos para melhorar o esquema de proteção diferencial do Transformador de Potência. Foram propostos vários algoritmos de proteção baseados em técnicas como: Redes Neurais Artificiais (RNA), Análise de Componentes Principais (ACP), Lógica Fuzzy (LF), Transformada de Fourier (TF), Transformada Wavelet (TW), entre outras. Porém, a maioria dessas técnicas de análise

apresentam desvantagens técnicas e/ou econômicas para sua implementação nos sistemas de proteção atuais. Além disto, a aparição das correntes *inrush* de energização nem sempre é considerada nessas metodologias, o que produz uma ineficiência operacional quando da discriminação correta desse fenômeno.

## 1.1 Motivação do Trabalho

O projeto de um algoritmo de proteção diferencial que seja rápido, simples, eficiente e robusto não é uma tarefa fácil. O desenvolvimento de um algoritmo que satisfaça a todos esses requisitos representa um importante desafio para os engenheiros de proteção e pesquisadores, fato que se tornou fonte de motivação para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Atualmente a grande maioria dos algoritmos propostos na área de proteção diferencial de transformadores de potência não cumpre com as características apresentadas anteriormente, fato que limita o campo de aplicação desses algoritmos ao âmbito laboratorial. Por esse motivo, o desenvolvimento de metodologias de proteção que sejam aplicáveis aos sistemas elétricos em tempo real é foco de muitos estudos e atrai o interesse de muitas companhias elétricas.

A utilização, teste e avaliação de novas ferramentas para a análise dos sinais transitórios traz uma visão diferente à metodologia de proteção convencional no que diz ao respeito da eficiência, aplicabilidade, robustez, velocidade de operação, entre outras. Essa comparação permitirá destacar quais são as vantagens e/ou desvantagens que as novas ferramentas de análise apresentam em relação da metodologia tradicional.

## 1.2 Objetivos

Considerando as limitações existentes nas metodologias que atualmente compõem o estado da arte na proteção diferencial de transformadores trifásicos, a presente dissertação de mestrado possui os seguintes objetivos:

- Utilizar a Transformada Wavelet para a análise das correntes trifásicas diferenciais quando da ocorrência de um distúrbio transitório ou de uma falta interna ao transformador.
- Avaliar o comportamento dos coeficientes de detalhe da decomposição wavelet para diferentes condições de falta interna e para diferentes distúrbios operacionais no sistema elétrico.
- Desenvolver e apresentar um algoritmo de proteção simples que possa ser utilizado para a proteção de transformadores de potência quando há uma falta interna.
- Avaliar a metodologia de proteção desenvolvida neste trabalho sob um sistema elétrico adequadamente modelado e testar o desempenho do algoritmo em diferentes condições de operação do transformador.
- Testar o comportamento do algoritmo de proteção quando da variação de características como: resistência de falta interna e externa, carga conectada na linha de transmissão, wavelet mãe utilizada na análise do sinal.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

Os capítulos que seguem descreverão e ilustrarão os conceitos propostos neste trabalho, o qual está estruturado da seguinte forma:

- No Capítulo 2, é apresentada uma visão geral do esquema de proteção diferencial convencional, focando na descrição das características de funcionamento do relé diferencial percentual. São abordadas também as principais causas de correntes diferenciais ditas indesejadas.
- No Capítulo 3 é apresentado um estudo do estado da arte das metodologias de proteção diferencial de transformadores trifásicos. São abordadas, neste capítulo, distintas metodologias de proteção diferencial de transformadores, descrevendo-as brevemente.
- O Capítulo 4 apresenta os critérios comumente utilizados para a modelagem dos transformadores. Neste capítulo, também é apresentada uma classificação dos modelos em função da faixa de frequência e em função do tipo de representação do transformador.
- O Capítulo 5 apresenta a metodologia de proteção proposta neste trabalho. Para tanto, é descrita a abordagem utilizada no projeto do algoritmo de proteção junto à construção numérica do algoritmo.
- No Capítulo 6 é apresentado o estudo de caso junto aos resultados obtidos nos testes da metodologia de proteção proposta. A descrição do sistema elétrico utilizado nas simulações também é apresentada.
- No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais deste trabalho, elucidando os conhecimentos agregados durante o desenvolvimento do mesmo.

## 2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DO TRANSFORMADOR

### 2.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo apresentar as características da proteção diferencial de transformadores trifásicos, sendo dada maior ênfase à discussão da proteção diferencial percentual.

Na seção 2.2 são apresentados os principais distúrbios, tanto externos quanto internos, que afetam o funcionamento normal do transformador, diferenciando-se as faltas incipientes das faltas repentinas. Além disso, uma breve revisão dos principais dispositivos utilizados nos esquemas de proteção para transformadores é também apresentada nesta seção.

Na seção 2.3 é apresentado e explicado o princípio de funcionamento do esquema de proteção diferencial tradicional. Após isso, é introduzido nesta seção o conceito do relé de proteção diferencial com característica percentual, e são apresentadas as principais vantagens operacionais que esse relé trouxe ao esquema de proteção diferencial de transformadores.

Por fim, na seção 2.4, são caracterizados os principais fenômenos que ocasionam correntes diferenciais e que, não sendo produzidas por faltas internas ao transformador, podem provocar a incorreta atuação do relé, reduzindo a eficiência do esquema de proteção como um todo.

### 2.2 Proteção de Transformadores

Um dos componentes mais importantes dentro dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são os transformadores. A função desse equipamento (principalmente como nó de interconexão entre a geração e a carga) é bastante importante, e o seu resguardo torna-se uma parte essencial dos Esquemas de Proteção<sup>1</sup> utilizados nos SEP pelas companhias elétricas. Na ocorrência de uma falta em um transformador, este deve ser imediatamente desconectado do sistema elétrico para evitar danos maiores e longos períodos de desabastecimento de energia. A sua rápida desconexão da rede permitirá que o SEP conserve a estabilidade e possa manter a qualidade da energia elétrica fornecida (OLIVEIRA et al., 2008).

---

<sup>1</sup> Esquemas de Proteção: Segundo Almeida et al. (2005), define-se como o conjunto de relés e dispositivos de proteção, outros dispositivos afins, equipamentos de teleproteção, circuitos de corrente alternada e corrente contínua, circuitos de comando e sinalização, disjuntores, etc. que associados têm por finalidade proteger componentes (linhas de transmissão, barramentos e equipamentos) ou parte do sistema elétrico de potência quando em condições anormais, indesejáveis ou intoleráveis.

Os principais distúrbios elétricos que afetam os transformadores podem ser de origem externa ou interna. Na filosofia da proteção diferencial, os distúrbios de origem externa são aqueles que acontecem fora da zona de proteção<sup>2</sup> do transformador, delimitada pelo local de instalação dos transformadores de corrente (TCs). Esses distúrbios podem ser caracterizados por sobrecargas, sobretensões, subfrequências e curtos-circuitos externos. As faltas ou distúrbios de origem interna são as que acontecem dentro da zona de proteção, e entre essas tem-se: curto-circuitos envolvendo fases, curto-circuitos entre espiras, curto-circuitos entre os enrolamentos de alta tensão e os de baixa tensão, curto-circuitos entre o enrolamento e a caixa do transformador, faltas no núcleo magnético, faltas no tanque de expansão, entre outras (ANDERSON, 1999).

Conforme a característica do efeito envolvido, as faltas podem ser classificadas como repentinas ou incipientes. As faltas repentinas são caracterizadas por terem uma ocorrência rápida e um curto período de duração. Este tipo de falta necessita ser detectada no menor tempo possível para evitar grandes danos no transformador e nos equipamentos associados a ele. Já as faltas incipientes são de ocorrência lenta, ou seja, acontecem de maneira progressiva e gradual no tempo e podem provocar grandes correntes de falta no transformador quando não são detectadas e corrigidas a tempo (ANDERSON, 1999). Por apresentarem essa característica progressiva no tempo, as faltas incipientes podem ser detectadas por procedimentos não elétricos entre os quais se destacam: a análise química do óleo ou do gás que ele desprende dentro da caixa do transformador e a detecção dos gases produzidos por faíscas nos enrolamentos do equipamento mediante o uso do relé de pressão e/ou de gás (CAMINHA, 1997).

Existem várias metodologias e dispositivos que podem ser aplicados na proteção de transformadores trifásicos. É evidente que o custo e a quantidade de dispositivos empregados relacionam-se com a confiabilidade a ser conferida ao sistema de proteção. No entanto, nem sempre a utilização de um maior número de dispositivos é uma técnica adequada, pois a sobreproteção do equipamento aumenta a sensibilidade do sistema, fazendo com que pequenos distúrbios provoquem desligamentos indesejados<sup>3</sup> do transformador (DE MELLO, 1979).

Nesse contexto, segundo (HOROWITZ; PHADKE, 1995) os dispositivos mais comumente utilizados na proteção de transformadores podem ser resumidos em: fusíveis, relés de sobrecorrente, relés de sobretensões, relés diferenciais e relés de pressão (*Buchholz*). Ainda, a proteção pode ser complementada com a monitoração da temperatura dos enrolamentos e a análise química dos gases e do óleo isolante. No entanto, os dispositivos mencionados anteriormente podem ser utilizados em diferentes configurações de proteção, entre as quais se destacam: Proteção Diferencial Percentual, Proteção Diferencial a Terra, Proteção de Sobrecorrente, Proteção para Transformadores de Regulação, Proteção para Transformadores de Aterramento, Proteção Remota de Transformadores e Esquemas de Proteções Não-Elétricas.

Esses esquemas de proteção mencionados anteriormente estão sistematicamente descritos em muitas bibliografias atuais, de tal forma que não serão mais tratados neste trabalho. No entanto, apresenta-se a seguir uma breve discussão sob a proteção diferencial com características de restrição percentual, dada a importância que a mesma tem no escopo desta dissertação.

---

<sup>2</sup> Chama-se zona de proteção aos limites físicos dentro dos quais o relé diferencial fica monitorando a ocorrência de alguma falta. Ditos limites ficam definidos geralmente pelo local de instalação dos TCs.

<sup>3</sup> Dito também de *Atuação Incorreta* dos esquemas de proteção, os desligamentos indesejados são quando a função, em resposta a uma ocorrência de falta ou anormalidade no sistema elétrico de potência, atua sem que tenha desempenhado a *performance* prevista na sua aplicação (ALMEIDA et al., 2005).

## 2.3 A Proteção Diferencial

A filosofia da proteção diferencial é amplamente utilizada pelas companhias elétricas de forma a evitar condições anormais de funcionamento dos equipamentos que integram um SEP. Essa filosofia aplica-se geralmente aos transformadores de potência, barramentos, grandes motores e geradores, linhas de transmissão que empregam sistemas de tele-proteção, entre outros.

Considerando o nível de tensão dos transformadores, o esquema de proteção diferencial com relé de sobrecorrente de disco de indução é utilizado para transformadores com potências entre 5 e 10 MVA<sup>4</sup>. Já para transformadores com potências acima de 10 MVA o relé diferencial percentual com restrição de harmônicas é o mais recomendado (HOROWITZ; PHADKE, 1995).

A metodologia de proteção diferencial baseia-se em uma comparação entre as correntes primárias e secundárias do transformador. A aquisição dessas correntes elétricas é feita através de TCs conectados em série com os ramos primários e secundários do sistema a proteger, tal como ilustra a Figura 2.1.

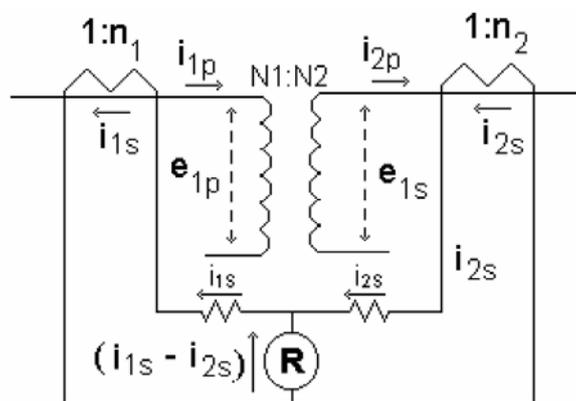


Figura 2.1: Esquema de proteção diferencial de um transformador monofásico.

Nessa Figura,  $N_1:N_2$  é a relação de transformação entre o primário e secundário do transformador protegido e  $1:n_1$  e  $1:n_2$  são as relações de transformação dos TCs instalados nos ramos primário e secundário, respectivamente. Assim, a corrente diferencial dada pela diferença fasorial entre as correntes secundárias dos TCs, ditas  $i_{1s}$  e  $i_{2s}$ , é então monitorada pelo relé diferencial (**R**) que desconecta o transformador do sistema elétrico caso a corrente diferencial que o atravessa seja maior que um valor limiar (*pickup*) estipulado. Quando o transformador encontra-se operando sem falta, ou quando uma falta externa acontece no sistema elétrico, as correntes secundárias dos TCs terão iguais valores absolutos e a corrente diferencial será praticamente zero, restringindo a operação do relé diferencial (**R**). Porém, um desequilíbrio entre as correntes secundárias  $i_{1s}$  e  $i_{2s}$  é percebido quando da ocorrência de uma falta interna ao transformador, o qual ocasiona uma corrente diferencial que sensibiliza o relé de proteção que, por sua vez, enviará um sinal de operação (abertura) ao disjuntor correspondente.

No esquema de proteção diferencial, quando empregado na proteção de transformadores de potência, a zona de proteção estende-se até o local de instalação dos TCs abrangendo uma região pouco além do transformador. Em alguns casos, a zona de proteção do relé diferencial pode ser ainda mais estendida para incluir outros

<sup>4</sup> MVA: Mega-Volts Amperes.

componentes, atuando assim como uma proteção secundária, onde se exige uma sensibilidade bem menor do relé em comparação com o relé específico que faz a proteção do equipamento (DOS SANTOS, 2006).

### 2.3.1 O Relé Diferencial Percentual

Os relés diferenciais percentuais surgiram como um aperfeiçoamento da proteção diferencial tradicional. Esses relés têm a vantagem de restringir a operação do interruptor associado quando da ocorrência de uma corrente diferencial originada por fatores diferentes a uma falta interna ao transformador. Entre esses fatores, podemos citar: mudanças de tapes<sup>5</sup>, saturação e erros próprios dos TCs e erros nas relações de transformação do transformador de potência.

No entanto, vale salientar que os relés diferenciais percentuais convencionais apresentam uma desvantagem significativa. Segundo (DE MELLO, 1979) os relés diferenciais percentuais são sensíveis às correntes transitórias de magnetização que ocorrem quando da energização normal do transformador e quando da remoção de faltas externas, fatos que ocasionam um aumento repentino na tensão dos terminais do transformador.

Junto com a filosofia do relé diferencial percentual, introduziu-se o conceito de “bobina de retenção”, ou rejeição, cuja característica de operação faz com que o relé não seja sensibilizado por pequenas correntes diferenciais, diferentes a faltas internas ocasionadas pelos fatores acima detalhados. Na Figura 2.2, mostra-se o esquema funcional monofásico de um relé percentual com suas bobinas de retenção (**r**) e operação (**o**). Ambas as bobinas cumprem um papel importante na operação ou restrição do relé de proteção (**R**).

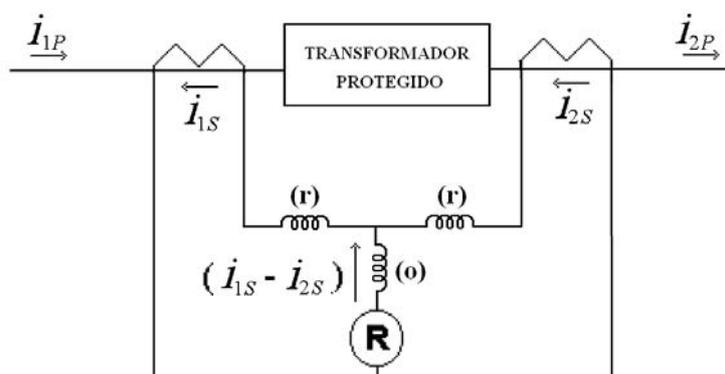


Figura 2.2: Esquema funcional do relé diferencial percentual.

Apesar da Figura 2.2 ilustrar a aplicação do relé diferencial percentual para um transformador monofásico, os relés diferenciais percentuais são igualmente aplicáveis para transformadores de multi-enrolamentos (DE MELLO, 1979).

Nessa filosofia de proteção as bobinas de retenção (**r**) serão percorridas por uma média das correntes secundárias passantes  $i_{1S}$  e  $i_{2S}$ . Assim, a corrente de restrição do relé fica definida como sendo:

$$i_r = \frac{(i_{1S} + i_{2S})}{2} \quad (2.1)$$

<sup>5</sup> Relações de transformação do transformador.

No entanto, a corrente na bobina de operação (**o**), chamada também como corrente de operação do relé, é igual à diferença entre as correntes  $i_{1S}$  e  $i_{2S}$ , ou seja:

$$i_{op} = i_{1S} - i_{2S} \quad (2.2)$$

Quando uma falta externa ao transformador acontece, as correntes  $i_{1S}$  e  $i_{2S}$  têm módulos iguais e mesmo sentido de circulação. Nessa condição,  $i_{1S} = i_{2S}$ , e a corrente de restrição do relé, dada pela equação (2.1), fica  $i_r = i_{1S} = i_{2S}$ . Ainda, a corrente de operação do relé é igual a zero,  $i_{op} = i_{1S} - i_{2S} = 0$ . Assim, ambas as correntes determinam as condições de “não operação” para o relé.

Porém, quando uma falta interna acontece no transformador, por exemplo no enrolamento secundário, a corrente  $i_{2S}$  percorre a região faltosa mudando seu sentido de circulação. Agora  $i_{2S}$  é negativa e a corrente de restrição fica como sendo:  $i_r = (i_{1S} + (-i_{2S})) / 2$ , enfraquecendo a atuação da bobina de restrição do relé. Do mesmo jeito, a corrente de operação fica  $i_{op} = i_{1S} - (-i_{2S}) = i_{1S} + i_{2S}$ , fortalecendo a “operação” do relé.

### 2.3.2 Característica de Operação do Relé Percentual

Para conseguir um funcionamento confiável<sup>6</sup> do esquema de proteção diferencial é preciso realizar ajustes nas relações de transformação (*taps*) do transformador de potência, 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 para a corrente de operação que determina o nível de corrente diferencial no qual o relé irá atuar. Essa margem de corrente é fixada por um determinado fator  $k$ , chamado *característica diferencial percentual*, que é definido como:

$$k_{[\%]} = \frac{i_{1S} - i_{2S}}{(i_{1S} + i_{2S})/2} = \frac{i_{op}}{i_r} \quad (2.3)$$

Os valores do fator  $k$  são expressos em percentagens, e indicam a inclinação da curva de operação do relé. A Figura 2.3 ilustra uma curva de característica percentual típica onde são detalhados os fatores que se consideram para adotar um dado fator  $k$  (HOROWITZ; PHADKE, 1995).

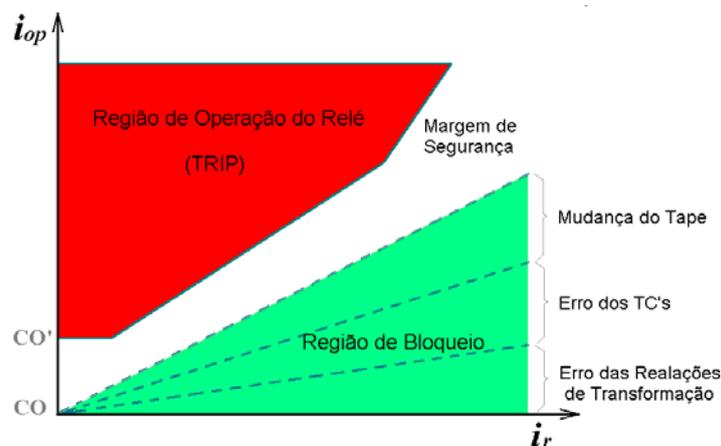


Figura 2.3: Característica de atuação da proteção diferencial percentual.

<sup>6</sup> Confiabilidade: A habilidade do sistema para atuar corretamente quando necessário e para evitar atuações incorretas<sup>1</sup> ou indevidas.

Sendo assim, o relé desligará o transformador trifásico sempre que a corrente diferencial,  $i_d$ , que o percorre satisfizer uma das relações logo apresentadas:

$$i_d \geq i_{op} \quad (2.4)$$

$$i_d \geq k(i_{1S} + i_{2S})/2 \quad (2.5)$$

$$i_d \geq k \cdot i_r \quad (2.6)$$

Nas equações anteriormente expostas,  $i_{op}$  representa a corrente mínima de operação e  $k$  a inclinação percentual da característica diferencial. Segundo (HOROWITZ; PHADKE, 1995), a adoção de um determinado fator  $k$  dependerá da importância do transformador, valores típicos geralmente são 10, 20 e 40% e note-se que quanto menor é o valor de  $k$  maior será a sensibilidade do relé.

Com relação ao valor inicial CO da corrente mínima  $i_{op}$  (Figura 2.3), sempre que o algoritmo do relé detectar uma situação de tolerância, como uma sobre-excitação ou uma falta externa, esse patamar CO é deslocado para acima do valor estipulado, por exemplo, até CO', e a curva do relé é então alterada, evitando a operação desnecessária do relé (DOS SANTOS, 2006).

Segundo (GUZMÁN et al., 2001), na prática é comum o emprego de duas inclinações diferentes, sendo que a primeira inclinação é mais sensível e utilizada para baixas correntes de carregamento, já que o erro introduzido pelos TCs é menor. A segunda inclinação é menos sensível e usada para altas correntes e seu objetivo é acomodar os maiores erros introduzidos pelos TCs devido às altas correntes de carga e possíveis saturações em condições de faltas externas.

## 2.4 Correntes Diferenciais Indesejadas

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. Essas situações são muito frequentes nos SEP e o relé diferencial deve ter a capacidade de discriminar corretamente uma condição de falta interna ao transformador.

A seguir, são apresentados alguns dos eventos que podem causar correntes diferenciais que não se devem à faltas internas ao transformador, destacando-se entre elas o fenômeno de energização que provoca as chamadas “correntes *inrush*”. Esse fenômeno é analisado e apresentado em detalhe no Anexo A, dado que é um dos principais problemas abordados neste trabalho.

### 2.4.1 Correntes de Magnetização Durante a Energização do Transformador (Correntes de *Inrush*)

Por causa do fenômeno da magnetização do núcleo magnético, no momento em que um transformador sem carga é energizado, aparecem na bobina de operação do relé de proteção correntes diferenciais cuja magnitude é definida pela inclinação da característica de magnetização na região de saturação e pela indutância de dispersão do transformador (HOROWITZ; PHADKE, 1995). Essas correntes, conhecidas como “Correntes de *Inrush*”, apresentam-se como picos transitórios cuja amplitude pode atingir valores elevados, dependendo da potência do transformador. Segundo (EBNER, 2007) quanto maior é a potência do transformador, maior será o índice de falhas devido a esse fenômeno.

Durante a manobra de energização, a amplitude da corrente *inrush* pode exceder o valor da corrente nominal do transformador, podendo atingir entre 10 e 20 vezes esse valor (LING; BASAK, 1988). Após isso, devido às perdas do circuito elétrico do transformador, a sua amplitude decai, atingindo o seu valor de estado permanente após alguns segundos. As correntes *inrush* transitórias têm uma alta componente DC (corrente contínua) e são ricas em componentes de 1ª e 2ª harmônicas fato que, além de afetar a qualidade da energia fornecida, pode provocar a atuação incorreta do relé de proteção (EBNER, 2007).

A Figura 2.4 ilustra esquematicamente a relação que há entre a corrente nominal ( $I_n$ ) do transformador e a corrente de *inrush* ( $I_r$ ) quando da energização do transformador. Os picos de corrente mostrados nesta figura podem chegar a valores próximos à corrente de curto-circuito do transformador.

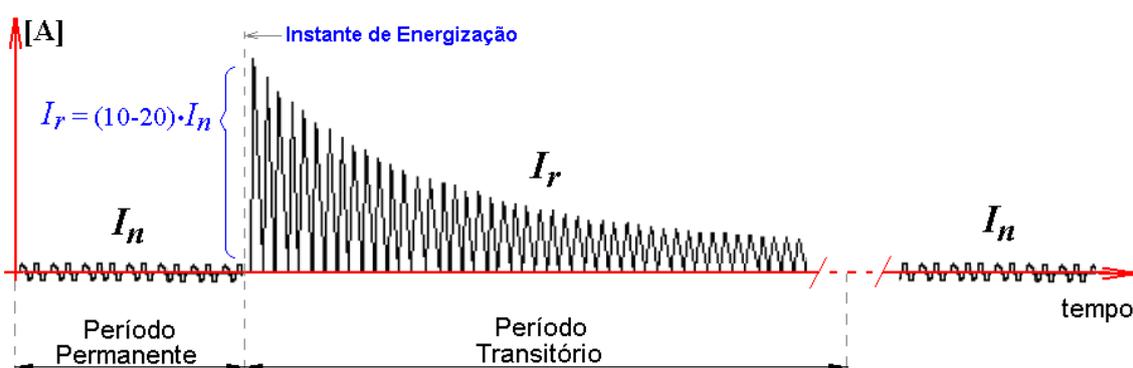


Figura 2.4: Relação esquemática entre a corrente nominal  $I_n$  e a corrente *inrush*  $I_r$ .

A amplitude e duração da corrente *inrush* dependem, entre outros, dos seguintes fatores (ANDERSON, 1999):

- Tamanho do banco de transformadores;
- Nível de tensão no SEP quando o banco de transformadores é energizado;
- Resistência no SEP desde a fonte equivalente até o banco de transformadores;
- Tipo de material utilizado na construção do núcleo do transformador;
- História prévia do banco de transformadores e existência de fluxo residual.

O relé diferencial percentual utilizado na proteção de transformadores deve ter a habilidade de 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*), dessensibilização do relé diferencial durante a energização e restrição de harmônicos.

Dos métodos mencionados anteriormente, o mais utilizado é o relé diferencial percentual com restrição por correntes harmônicas. Uma análise dos sinais transitórios de magnetização típica demonstra que essa corrente é composta principalmente por componentes harmônicas de 2º ordem (características utilizadas para restringir a operação dos relés diferenciais) enquanto que em uma situação de falta a corrente será principalmente composta por componentes de frequência fundamental (DE MELLO, 1979).

No entanto, existe a possibilidade de que componentes de 2ª harmônica estejam presentes quando acontecem faltas internas ao transformador. Essas correntes

acontecem por fatores como: saturação dos transformadores de corrente no caso de uma falta interna 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 et al., 2007).

Essa situação faz com que o método de restrição de harmônicas utilizado pelo relé convencional não seja eficiente, justificando a utilização de outras técnicas de análise para o estudo da corrente *Inrush*. Entre essas técnicas destaca-se o uso de ferramentas como: Elementos Finitos (EF), Redes Neurais Artificiais (RNA) e Lógica Fuzzy (LF), entre outras (WANG et al., 2001; YOUSSEF, 2004; ZAMAN et al., 1996).

#### **2.4.2 Saturação dos TCs**

O núcleo de ferro de um transformador tem uma capacidade de transmissão de fluxo magnético limitada. Essa limitação se deve às propriedades físicas dos materiais utilizados na construção destes núcleos (KENNEDY, 1998). Esse fato contribui para que esses equipamentos fiquem susceptíveis ao fenômeno de saturação. Esta é provocada pelo aumento excessivo do fluxo de magnetização que, por sua vez, é diretamente proporcional ao nível de tensão aplicado sobre os enrolamentos do transformador e inversamente proporcional à frequência do sistema elétrico (ANDERSON, 1999).

Dentro do esquema de proteção diferencial, os transformadores de corrente têm a importante missão de transformar as correntes oriundas do sistema de potência em correntes equivalentes e de baixa magnitude, de modo de facilitar sua medição. Além disso, os TCs devem fornecer isolamento galvânico entre a rede elétrica e os relés ou outros instrumentos conectados ao seu enrolamento secundário (DE MELLO, 1979).

Em determinadas situações de operação do transformador, como em faltas externas próximas, as correntes que atravessam os enrolamentos primários dos TCs atingem valores de até 50 vezes a magnitude da corrente de carga nominal (HOROWITZ; PHADKE, 1995). Segundo Anderson (1999), essa corrente de falta elevada pode saturar o núcleo magnético e produzir uma distorção importante nas correntes secundárias dos TCs. Essa distorção impede a correta representação da corrente primária, podendo gerar uma considerável corrente diferencial pelo 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 projetos de um sistema de proteção diferencial.

#### **2.4.3 Sobre-excitação do Transformador**

Quando um transformador encontra-se operando em condições de sobre-excitação suas correntes podem apresentar um comportamento não-linear ante 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 para evitar danos maiores (KENNEDY, 1998).

Durante o fenômeno de sobre-excitação, conforme encontrado na literatura consultada (ANDERSON, 1999; GUZMÁN et al., 2001), 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. 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 (ANDERSON, 1999). Caso esses valores excedam a um limiar pré-estabelecido, o relé pode bloquear a sua operação ou considerar uma nova inclinação a partir do ponto CO' de acordo como ilustrado na Figura 2.3, possibilitando um aumento na margem de tolerância do dispositivo de proteção.

#### 2.4.4 Remoção de Falhas Próximas ao Transformador

Quando uma falta externa e 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 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 DC –corrente contínua– do fluxo concatenado. Desse modo, as formas de onda de 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, então, a corrente gerada é geralmente menor que durante a energização do transformador (HOROWITZ; PHADKE, 1995).

#### 2.4.5 Rejeição de Carga

Segundo (HOROWITZ; PHADKE, 1995), durante as rejeições de carga o transformador pode estar sujeito a sobretensões em regime permanente, dado que esse fenômeno está ligado diretamente com a frequência e a tensão do sistema. Quando um sistema se encontra estável (frequência de 60 Hz), a potência mecânica de entrada do eixo do gerador é igual à soma das cargas conectadas a esse, somadas ainda as perdas de potência reais no sistema. Qualquer significativa interferência nesse balanço causa uma mudança na frequência das grandezas elétricas geradas pela máquina (BRETAS et al., 2000). Como consequência, tem-se que a enorme massa rotacional do rotor (turbina e gerador) atua como um depósito de energia cinética. Logo, quando existe um aumento de carga o rotor diminui a velocidade, suprimindo energia para o sistema. De modo oposto, quando há uma redução considerável da carga o gerador acelera absorvendo energia. Sendo assim, qualquer mudança na velocidade causa uma variação proporcional à 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 irão causar um aumento além do normal no fluxo magnético que percorre o núcleo, podendo resultar em um aumento substancial da temperatura no mesmo (ANDERSON, 1999). Nessas condições, o transformador pode ser submetido a formas de onda distorcidas, compostas por harmônicos ímpares, particularmente de 3º e 5º ordem. Desse modo, o transformador apresenta uma característica não-linear, fazendo surgir correntes diferenciais não nulas e, conseqüentemente, sensibilizando a proteção diferencial de forma indesejável.

#### 2.4.6 Diferenças nas Características dos TCs

A bibliografia consultada (ANDERSON, 1999) recomenda que em uma aplicação de proteção diferencial sempre se tem que utilizar TCs de características similares em ambos os lados do transformador de potência. Por exemplo, se ambos os TCs apresentam diferentes níveis de precisão, um aumento na carga secundária<sup>7</sup> do TC com maior exatidão tenderá a equilibrar as diferenças nas características de precisão de ambos os TCs (DE MELLO, 1979). Cabe salientar que, segundo (CAMINHA, 1997), um TC com o seu secundário curto-circuitado apresenta uma diminuição dos 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 é a carga e mais exato será o TC.

### 2.5 Resumo

O esquema de proteção diferencial é o mais utilizado quando da proteção dos transformadores perante faltas de origem interna. Nesse contexto, este capítulo iniciou-se com uma apresentação dos principais conceitos e características da proteção diferencial de transformadores trifásicos, priorizando o estudo da proteção diferencial percentual. As principais características operacionais e o esquema básico de conexões do relé percentual foram logo introduzidos no capítulo, no intuito de esclarecer as soluções que esse tipo de relé trouxe aos problemas encontrados no esquema de proteção diferencial clássico.

A grande quantidade de manobras e situações em que os transformadores ficam expostos durante a sua operação nos SEP faz com que se apresentem inúmeras causas que, não sendo provocadas por defeitos internos ao transformador, dão origem a importantes correntes diferenciais no circuito de operação de relé de proteção. Essas correntes diferenciais são ditas “indesejadas” pelo fato de sensibilizarem a operação do relé diferencial provocando a sua incorreta operação. Diante disso, uma breve e importante explicação dos fenômenos que originam as chamadas correntes diferenciais indesejadas é também apresentada no decorrer deste capítulo.

A corrente de magnetização *Inrush* apresenta-se como uma das principais correntes diferenciais indesejadas que provocam falsas operações nos relés de proteção, fato que originou o desenvolvimento deste trabalho e razão pela qual se apresenta em detalhe no Anexo A desta dissertação.

---

<sup>7</sup> A carga secundária equivale à quantidade de impedância externa conectada no circuito secundário do TC.

## 3 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE

### 3.1 Introdução

A grande quantidade de publicações encontradas em revistas especializadas, conferências, dissertações e teses mostram o progresso atingido por trabalhos recentes na área da Proteção Diferencial Digital de Transformadores de Potência. A maioria desses trabalhos propõe diferentes metodologias para a resolução dos problemas encontrados nos esquemas de proteção diferencial tradicionais.

Cabe ressaltar que o objetivo desta revisão é apresentar alguns dos aprimoramentos encontrados no que se refere à proteção digital direcionada aos transformadores de potência. São apresentados a seguir alguns dos trabalhos de maior destaque, os quais foram divididos em três grandes grupos, a saber: pesquisas que estudam a proteção diferencial de transformadores utilizando ferramentas inteligentes; estudos que envolvem a utilização da Transformada Wavelet; e finalmente, trabalhos que propõem a utilização e combinação de diferentes técnicas e/ou ferramentas de análise.

Nesse contexto, na seção 3.2 são apresentadas as principais publicações referentes à proteção de transformadores de potência baseadas na utilização de ferramentas inteligentes tais como: Redes Neurais Artificiais, Análise de Componentes Principais, Lógica Fuzzy, entre outras.

Na seção 3.3, descrevem-se aqueles trabalhos cujos esquemas de proteção diferencial baseiam-se na aplicação da TW como ferramenta de discriminação dos distúrbios elétricos transitórios. Diante disso, esta seção apresenta vários trabalhos de pesquisa que utilizam diferentes tipos de TW na análise dos eventos que acontecem no transformador. Ainda, a utilização e comparação de diferentes funções wavelet, ditas *wavelets mães*<sup>8</sup>, são aplicadas nos trabalhos descritos nesta seção.

Por fim, na seção 3.4 são apresentados aqueles trabalhos de pesquisa que combinam diferentes técnicas de análise para projetar um sistema de proteção diferencial de transformadores.

### 3.2 Proteção Diferencial Digital de Transformadores

O fenômeno da magnetização *inrush* acontece quando da energização do transformador (LI et al., 1998). É muito importante compreender que a corrente transitória que aparece nesse caso não é uma condição de falta e, portanto, o relé de proteção diferencial não deve atuar devendo-se manter em estado de não-operação durante a corrente transitória de *inrush*. Segundo (MAO et al., 2000) a correta discriminação entre as correntes *inrush* transitórias e uma situação real de falta interna

---

<sup>8</sup> Ver definição no Anexo B.

ao transformador apresentam-se como um dos problemas mais desafiadores para os engenheiros quando da proteção de transformadores de potência. Nesse sentido, hoje em dia existem muitas metodologias para diferenciar essas situações, sendo as principais: 1) *o método de restrição de harmônicas*, baseado no comportamento das componentes harmônicas das correntes diferenciais; 2) *o princípio do fluxo disperso*, baseado na característica magnética do núcleo; 3) *o princípio do circuito equivalente*, baseado na mudança da indutância magnética (LI et al., 1998).

Apresenta-se a seguir uma breve revisão bibliográfica das diferentes metodologias propostas para utilização nos relés diferenciais, no intuito de conhecer as distintas abordagens empregadas nesses estudos. Sendo assim, destaca-se inicialmente o trabalho de (RAHMAN; JEYASURYA, 1988) que realizaram uma revisão dos algoritmos de proteção digital de transformadores e os compararam, analisando a base matemática, as velocidades de resposta, o esforço computacional e a eficiência quanto à discriminação entre correntes de magnetização 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. Os estudos mostraram que os algoritmos analisados 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 melhores condições de aplicabilidade num relé diferencial com microprocessador.

(LING e BASAK, 1988) apresentam um sistema para medição e análise do conteúdo harmônico presente na corrente de magnetização de um transformador monofásico. A amostragem dos dados da corrente de magnetização *inrush* 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 a corrente de magnetização *inrush*. A metodologia proposta apresenta a vantagem de medir eficientemente a magnitude, duração e conteúdo de harmônicas de cada ciclo da corrente de magnetização *inrush*. Os mesmos autores (LING; BASAK, 1989) apresentam um outro trabalho cujo objetivo é analisar o comportamento do conteúdo de 2ª harmônicas da corrente de energização em transformadores monofásicos e trifásicos quando da variação de 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 de energização. A avaliação do algoritmo de detecção proposta também é efetuada computacionalmente.

No mesmo ano (SACHDEV et al., 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 (curva B-H)<sup>9</sup>, além de não utilizar a magnitude das corrente harmônicas de 2º ordem para o processo de restrição do relé durante as condições de magnetização *inrush*.

No trabalho de (MURTY; SMOLINSKI, 1990), estuda-se o projeto e construção em tempo real de um relé diferencial percentual digital baseado em um filtro de Kalman. O filtro de Kalman de 11 estados é utilizado para estimar a componente fundamental e a

---

<sup>9</sup> Curvas B-H: Curvas de magnetização obtidas experimentalmente e que relacionam a indução magnética (B) de um determinado material com a intensidade de campo magnético ou excitação magnética (H) aplicada.

componente de 5ª harmônica dos sinais de corrente do transformador. O relé baseia-se na restrição da 2ª harmônica para diferenciar as condições de magnetização *inrush* e da 5ª harmônica para a detecção das condições de sobre-excitação. O tempo de operação do relé é de meio ciclo quando da faltas internas e é constituído por um processador digital de sinais tipo TMS320. O relé proposto foi testado em tempo real utilizando um transformador de potência trifásico de laboratório.

(SIDHU e SACHDEV, 1992) apresentam um sistema baseado em microprocessadores para identificação em tempo real da magnetização *inrush* e condições de faltas internas. O sistema proposto utiliza um algoritmo digital baseado no modelo do transformador e pode ser utilizado, independentemente do fato de que se poderá ou não medir a corrente dos enrolamentos, como ferramenta de diagnóstico das faltas internas ao transformador. O sistema proposto pelos autores é adequado para monitorar o estado operacional do transformador e controlar a operação do relé diferencial. A construção do algoritmo proposto sobre um microprocessador utiliza os dados de seis sinais de corrente e seis de tensão amostrados e processados em tempo real para discriminar a magnetização *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 por (LIN et al., parte I, 1993), (KEZUNOVIC et al., 1994), (PEREZ et al., 1994), (KOLLA, 1995), (WISZNIEWSKI et al., 1995), (STRINGER et al., 1997), (MAO et al., 1998), (KASZTENNY e KEZUNOVIC, 1998), (GUZMÁN et al., parte I, 2001), (GUZMÁN et al., parte II, 2002).

Nos trabalhos mais recentes, destaca-se inicialmente o apresentado por (HE et al., 2006), no qual propõe-se um esquema para identificação de corrente *inrush* baseado na estimação de erros entre dois sinais. Nesse algoritmo, utiliza-se a forma de onda das correntes *inrush* (as quais se apresentam como ondas de pico que decaem ao longo do tempo) 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. Os trabalhos de (TRIPATHY et al., 2006 e 2008) apresentam um esquema de proteção diferencial baseado em Redes Neurais Probabilísticas (*Probabilistic Neural Network – PNN*). A técnica, conhecida como *Particle Swarm Optimization*, é utilizada nesses trabalhos para selecionar o valor ótimo dos parâmetros das PNN.

Finalmente, (VÁZQUEZ et al., 2008) propõe um esquema de proteção diferencial de transformadores baseado na Análise de Componentes Principais. Essa metodologia de proteção utiliza um padrão de reconhecimento para correntes diferenciais como fator de identificação das correntes *inrush*. Esse padrão de reconhecimento é obtido como a soma dos fasores das correntes secundárias dos TCs.

### 3.3 Proteção Diferencial de Transformadores Utilizando a TW

Nos últimos anos, 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 et al., 1998) que apresentaram uma pesquisa sob a identificação de corrente *inrush* em transformadores utilizando Transformada Wavelet Diádica<sup>10</sup> (TWDI). As correntes *inrush* são simuladas utilizando o software EMTP

---

<sup>10</sup> Ver Definição em Anexo B.

(*Electromagnetic Transient Program*) com diferentes valores de fluxo remanescente e vários instantes de energização, escolhidos para produzir diferentes correntes. A transformada Diádica é utilizada para a análise de assinatura das ondas *inrush* simuladas. Este trabalho apresenta somente resultados preliminares obtidos de um projeto de pesquisa e a família wavelet tipo *Daubechies* é escolhida para o estudo. Nesse mesmo sentido, outro trabalho similar foi apresentado anos mais tarde por (YANG et al., 2001) o qual também utiliza a TWDI para a análise e diferenciação dos distúrbios em transformadores.

Em outro trabalho (GÓMES-MORANTE e NICOLETTI, 1999) propõem um estudo baseado na análise wavelet para discriminar correntes *inrush* de correntes provocadas por faltas internas ao transformador. 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-freqüência pode ser dividido em vários retângulos (*tiles*) 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-freqüência. O esquema apresentado neste trabalho baseia-se na caracterização do fenômeno *inrush* através da análise de distribuição da energia de suas correntes dentro desses retângulos do plano tempo-freqüência. A técnica de discriminação utilizada baseia-se em uma análise estatística onde é avaliada a probabilidade de que um determinado vetor pertença a um determinado grupo de retângulos dentro do plano tempo-freqüência. Esses grupos definem-se como: Grupo A (correntes de arco interno) e Grupo I (correntes *inrush*). Um espaço 13-dimensional dos Grupos A e I foi definido através da média do vetor e da matriz covariância, utilizando vinte correntes em cada caso estudado.

(BO et al., 2000) apresentaram uma técnica que preocupa-se com a detecção de faltas que geram correntes transitórias de alta freqüência. Um relé especialmente projetado é sintonizado para as faixas de alta freqüência para capturar os sinais de corrente transitória em ambos os lados do transformador. As correntes trifásicas são logo convertidas em dois sinais modais através de um circuito modal misto. Um filtro multicanal, que consiste na parte principal desse relé, é logo aplicado sobre os sinais modais para extrair as faixas de alta freqüência desejadas e as correntes diferenciais e médias entre os dois lados do transformador são logo calculadas. 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 freqüência contidas no sinal de corrente transitória. O sinal de restrição para correntes *inrush* é obtido através da relação entre o índice de energia espectral do sinal transitório e a corrente fundamental que é utilizada como base de comparação. A correta seleção da freqüência central do filtro de transitórios do relé proposto é fundamental para o desenvolvimento satisfatório desse esquema.

(MAO e AGGARWAL, 2000) também propuseram um método de decisão lógica para discriminar entre faltas internas e correntes *inrush* em transformadores de potência utilizando a TW. A TW é principalmente aplicada para decompor o sinal de corrente diferencial em uma série de componentes wavelet, cada uma das quais é um sinal no domínio-tempo que cobre uma faixa de freqüência específica. Nesse trabalho, dois sistemas elétricos foram estudados para demonstrar o funcionamento da metodologia. As simulações foram feitas com o *software* EMTP. Em cada simulação do sistema, os parâmetros do transformador e o tipo de falta são modificados, incluindo o local da falta, o ângulo de inserção e o fluxo remanescente no transformador, considerando-se

também a saturação dos TCs. A distinção é feita em função da mudança de um índice definido pela relação entre o valor máximo do detalhe wavelet na primeira janela de análise e o valor máximo do detalhe wavelet na  $k$ -ésima janela subsequente.

(YOUSSEF, 2003) propôs uma técnica baseada na Transformada Wavelet Discreta (TWD) para diferenciar entre correntes de falta interna e correntes de magnetização *inrush* em transformadores. O tempo de operação do esquema proposto é inferior à metade de um ciclo do sistema de potência (baseado em uma frequência de amostragem de 5 kHz). Um transformador de 132/11 kV<sup>11</sup> 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. A componente de segunda harmônica é utilizada como a componente característica de uma magnetização assimétrica peculiar para o fenômeno *inrush*. A técnica detecta as correntes *inrush* por extração das componentes wavelet contidas nas três linhas de corrente, utilizando dados extraídos de uma janela menor que a metade do ciclo da frequência do sistema.

(BUTLER-PURRY e BAGRIYANIK, 2003) também apresentam uma metodologia para caracterizar transitórios que resultam de faltas internas em transformadores utilizando a TWD. Os parâmetros do circuito equivalente que representam o transformador com faltas internas 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 et al., 2005) e (SEDIGHI et al., 2005).

No trabalho de (SALEH e 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 transformadores de potência trifásicos. O algoritmo proposto é construído utilizando um Processador Digital de Sinais (DSP) 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 (SALEH; RAHMAN, 2005) apresentaram, alguns anos depois uma extensão na proteção diferencial de transformadores baseado na TWP anteriormente proposta. A seleção da análise wavelet ótima, que inclui tanto a escolha da wavelet mãe como o número ótimo de níveis de resolução, é apresentada nesse trabalho utilizando o critério da descrição de comprimento mínimo (MDL). O MDL é um dos novos critérios utilizados para a seleção de uma análise wavelet ótima. Nesse trabalho, a análise MDL é aplicada sobre correntes diferenciais extraídas de um protótipo de transformador trifásico montado em laboratório.

(EISSA, 2005) apresentou uma técnica digital direcional para proteção de transformadores baseada também na TWP. Um transformador de 11/132 kV é ligado a um sistema de potência de 132 kV e utilizado para o estudo da metodologia mediante simulações computacionais realizadas com o ATP/EMTP *software*. Essa metodologia

---

<sup>11</sup> kV: kilo-Volts.

utiliza os sinais de corrente de falta e de tensão pré-falta como sinais direcionais. A TWP é uma extensão da TW que permite uma melhor caracterização do sinal no domínio tempo-freqüência. A técnica baseia-se em uma derivação de uma função proporcional direcional para os sinais de tensão e corrente depois do início da falta. A tensão pré-falta é utilizada como uma referência direcional. Quando uma falta interna ao transformador acontece, os sinais de corrente e tensão ficam expostas às mudanças direcionais que são utilizados neste trabalho para discriminar o tipo de distúrbio acontecido. (ÖSGÖNENEL et al., 2005) apresentaram uma metodologia que utiliza uma decomposição wavelet discreta para distinguir entre correntes de magnetização *inrush* e faltas internas. Nesse estudo, o principal objetivo é identificar e analisar as descontinuidades nos sinais de corrente quando há uma falta fase-fase ou fase-terra interna ao transformador. A primeira decomposição de detalhes é utilizada nesse algoritmo, bem como a família de wavelet do tipo “Coiflet 6”, para a análise das descontinuidades nas correntes de fase obtidas através dos terminais do transformador. Os resultados dos testes feitos com o programa ATP/EMTP indicaram que, sob todas as condições descritas, o dispositivo de proteção respondeu corretamente, verificando-se uma melhoria no princípio da restrição por harmônicos.

(KUMAR et al., 2005) apresentaram uma aplicação da Transformada Wavelet Contínua (TWC) para a detecção de faltas nos enrolamentos de Alta Tensão (AT) dos transformadores de potência 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 de potência foi analisada usando a ferramenta MatLab® Wavelet Toolbox.

(FAIZ e LOTFI-FARD, 2006) propuseram um algoritmo baseado no processamento das correntes diferenciais para a proteção digital de transformadores de potência, considerando o comportamento desigual que essas correntes apresentam quando da faltas internas e correntes *inrush*. Nessa metodologia, o critério de decisão é definido em termos da diferença de amplitude dos coeficientes wavelet sob uma faixa específica de freqüências. O critério de decisão é utilizado nas três fases e as faltas internas são discriminadas das correntes *inrush* em 1/4 de ciclo depois do distúrbio e isso se apresenta como uma vantagem dessa metodologia. Outra vantagem é que ela não depende da definição de um limiar (*threshold*). A metodologia foi testada com ajuda do *software* PSCAD/EMTDC (*Electromagnetic Power Transients Software – HVDC of Monitova Hydro*). Além disso, a metodologia é testada em tempo real utilizando dados coletados de um protótipo de transformador trifásico de laboratório. Determinou-se também que a amplitude das altas freqüências no instante inicial da falta tem uma tendência decrescente, fato claramente visível no nível do Detalhe 5 (D5) da TW. Assim, as amplitudes dos dois primeiros picos da corrente diferencial em D5 são consideradas na decisão lógica do algoritmo e são chamadas X e Y; no caso de falta interna  $X > Y$  e no caso de corrente *inrush*  $X < Y$ .

(HE et al., 2006) propuseram um esquema de proteção para transformadores de potência baseado na comparação de polaridade dos sinais de corrente. As correntes de falta e *inrush* podem ser facilmente reconhecidas pela polaridade adotada pelas correntes em ambos os lados do transformador. Nesse trabalho, a discriminação entre corrente de *inrush* e correntes de falta interna é feita por comparação da polaridade dos módulos dos picos máximos das correntes no enrolamento primário e secundário do transformador através da TW. Nesse estudo, a wavelet mãe tipo “Daubechies 4” (dB4) foi utilizada para construir um banco de filtros de cinco níveis para extrair o sinal transitório, e as simulações foram feitas com o *software* PSCAD/EMTDC. As correntes de *inrush* fluem somente em um dos enrolamentos do transformador, não apresentando

picos máximos no outro enrolamento. Os testes realizados mostraram que, quando uma falta interna acontece, os picos máximos das correntes nos enrolamentos de ambos os lados do transformador apresentam a mesma polaridade. Já quando há uma falta externa ao transformador, esses picos apresentam polaridades diferentes. Assim, essa característica é utilizada para desenvolver o critério de decisão do algoritmo proposto neste trabalho.

(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, baseada em um método computacional é proposta para distinguir entre correntes *inrush*, condições normais de operação, mudanças na carga e faltas internas. Os valores *rms*<sup>12</sup> dos coeficientes da TWC são calculados em cada janela de análise e possibilitam observar que o gradiente da curva *rms* apresenta características que permitem distinguir as diferentes condições de funcionamento. Nesse trabalho, a wavelet mãe tipo “*Mexican Hat*” foi utilizada para a extração das características de discriminação utilizadas pelo algoritmo. Dentro do mesmo tema (VALSAN et al., 2008) estudaram 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 é de 6 milissegundos (ms), próximos de 1/3 do período do ciclo (16,67 ms), 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, 132/33 kV, conexão Y-Δ. 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. Porém, cabe aqui a observação de que a metodologia proposta precisa de seis sinais de corrente e seis de tensão para discriminar o tipo de falta, o que poderia tornar economicamente inviável o esquema proposto. Por outro lado (OU et al., 2007) apresentam um esquema de proteção utilizando a Transformada Wavelet De-Noising.

Recentemente (MEGAHED et al., 2008) propuseram uma metodologia de proteção diferencial para transformadores de potência baseada na energia de determinados detalhes da TW. Este trabalho apresenta um novo esquema de proteção que aumenta a confiabilidade do relé de proteção convencional. Novamente, a TWD é utilizada para extrair importante informação das componentes de baixa frequência das correntes diferenciais trifásicas. 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 *inrush* e faltas internas no algoritmo de proteção. O esquema proposto é testado utilizando simulação de faltas internas com o programa PSCAD. Neste trabalho observa-se que as mudanças na energia espectral tendem a apresentar um valor reduzido em casos de faltas internas, enquanto que oscilam em valores altos quando de casos de corrente *inrush*. A TW e o esquema de proteção são construídos em ambiente MatLab®.

---

<sup>12</sup> *rms*: valor eficaz -*root mean square*.

### 3.4 Proteção Diferencial de Transformadores Utilizando a Combinação de Técnicas de Análise

(MAO e AGGARWAL, 2001) apresentaram uma nova abordagem para classificar os fenômenos transitórios em transformadores de potência utilizando uma combinação de TW e RNA. A TW é utilizada primeiramente para decompor o sinal de corrente diferencial do transformador de potência em uma série de detalhes de componentes wavelet. A energia espectral das componentes wavelet é obtida e logo utilizada para treinar a rede neural. Essa última é utilizada para discriminar uma falta interna de um fenômeno *inrush*. A wavelet mãe *Daubechies 4* é utilizada neste trabalho.

No mesmo tema (GEETHANJALI et al., 2002) também apresentaram um algoritmo de proteção para transformadores trifásicos baseado na combinação das TW junto a RNA. Diversas condições de operação (normal, *inrush*, sobre-excitação, saturação dos TCs e faltas internas) foram simuladas neste trabalho. A TW é utilizada na análise de transitórios em transformadores de potência por sua habilidade para extrair informação dos sinais transitórios em ambos os domínios, tempo e frequência. As RNA são utilizadas aqui por causa de sua capacidade de auto-aprendizagem e alta capacidade de mapeamento não-linear. O esquema de proteção proposto foi realizado através de duas arquiteturas de RNA, uma utilizada como Detector de Falhas Internas (IFD) e a outra utilizada como um Monitor de Condição (CM). Essas duas arquiteturas foram treinadas utilizando o BPN (*Back Propagation Algorithm*) atuando sozinho e combinando o BPN com a TW de modo que a rede neural pudesse reconhecer e classificar todas as condições de operação acima detalhadas. A TW é primeiramente aplicada para decompor o sinal de corrente diferencial do transformador de potência em uma série de componentes wavelet, onde cada uma abrange uma determinada faixa de frequências. As RNA são projetadas para classificar as faltas internas das outras condições de operação a partir das informações fornecidas pela TW nas entradas das RNA. O trabalho de (MORTAZAVI e ZADEH, 2004) apresenta também uma abordagem sob a proteção diferencial de transformadores que utiliza a combinação dessas duas ferramentas de análise.

Em outra abordagem (NGAOPITAKKUL et al., 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, são simuladas utilizando o software ATP/EMTP. O processo de treinamento das redes neurais 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. Vários casos de faltas baseados nos sistemas de transmissão e distribuição da Tailândia foram estudados para verificar a eficiência do algoritmo proposto.

(MONSEF et al., 2007) propuseram um método de proteção diferencial para transformadores de potência que utiliza a combinação de TW junto a 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. O

número de dados é altamente dependente do número de parâmetros adaptativos, os quais também dependem do número de entradas. Quando o número de parâmetros adaptativos aumenta o sistema requer mais amostras para seu treinamento, aumentando assim, consideravelmente o tempo de resposta do algoritmo. Portanto, nesta metodologia, o número de entradas tem que ser reduzido para permitir que o sistema de *Interface Fuzzy* reconheça e discrimine corretamente a falta. A metodologia é testada através de simulações feitas com o *software* PSCDA/EMTDC. Além disso, a metodologia foi testada em tempo real utilizando dados coletados de um protótipo de laboratório de um transformador trifásico.

Por fim, (ABED et al., 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. Dois tipos de faltas foram modelados, falta espira-terra e falta espira-espira, com e sem arcos elétricos. A TWD foi utilizada para extrair as características da corrente de falta do transformador. Neste trabalho, quatro níveis de decomposição e a wavelet mãe tipo “*Daubechies 20*” foram utilizados para a identificação da falta.

### 3.5 Resumo

Em anos recentes, um grande número de trabalhos relacionados a pesquisas de proteção diferencial de transformadores utilizando a Transformada Wavelet foram realizados. Nesse contexto, 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.

Neste capítulo foram apresentadas as principais abordagens encontradas a respeito da proteção diferencial digital de transformadores de potência. Apresentaram-se 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 neste capítulo 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 Transformada Wavelet e, por fim, esquemas de proteção baseados na combinação operacional de diferentes técnicas e/ou ferramentas de análise.

## 4 MODELAGEM DE TRANSFORMADORES

### 4.1 Introdução

O desenvolvimento e a validação de algoritmos de proteção para transformadores de potência exigem a determinação preliminar do modelo de transformador a utilizar. A correta representação do transformador é fundamental para os estudos de transitórios eletromagnéticos, ainda mais quando se trata do desenvolvimento de novas técnicas de proteção. O modelo utilizado tem que considerar a maior quantidade de parâmetros físico-elétricos encontrados no transformador e representar corretamente o comportamento desse equipamento. Nesse contexto, este capítulo busca expor uma breve revisão bibliográfica referente às diferentes abordagens sobre a modelagem dos transformadores. O objetivo é apresentar como os parâmetros de projeto dos transformadores influenciam na modelagem desse equipamento.

Na seção 4.2, são apresentadas as principais considerações para a modelagem dos transformadores.

Na seção 4.3, uma classificação dos eventos elétricos em função da faixa de frequência dos seus sinais transitórios é exposta.

Na seção 4.4, os critérios mais utilizados para a classificação dos modelos de transformadores são descritos.

Na seção 4.5, são apresentados os modelos de transformadores em função da faixa de frequência, classificando-os em modelos para baixas, médias e altas frequências.

Por fim, na última seção, a modelagem do transformador segundo o comportamento linear e não-linear dos seus componentes é desenvolvida.

### 4.2 Principais Características dos Transformadores

Os transformadores desempenham funções extremamente importantes dentro dos Sistemas Elétricos de Potência. 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 o estado de operação normal<sup>13</sup>, trabalhem próximos ao joelho da curva de saturação magnética do núcleo de ferro. Essa situação faz com que o núcleo magnético apresente

---

<sup>13</sup> Entenda-se como *estado de operação normal* as condições de funcionamento nas quais o transformador atende as exigências técnicas mínimas estabelecidas.

características não-lineares devido principalmente às perdas por histerese<sup>14</sup> e às correntes induzidas<sup>15</sup>. Como consequência disso, durante determinadas manobras (por exemplo, a energização do transformador) correntes extremamente elevadas e distorcidas, contendo um elevado número de harmônicas, são registradas (CHEN et al., 1997).

Segundo (MARTINEZ et al., 2005a) 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 dos transformadores são tanto não-lineares quanto dependentes da frequência. Diante disso, as características físicas, cujo comportamento depende da frequência, que devem ser corretamente representadas na modelagem do transformador são: as configurações do núcleo e dos enrolamentos, as indutâncias próprias e mútuas entre os enrolamentos, o fluxo de dispersão, o efeito *skin*<sup>16</sup> 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 em *softwares* para simulação de transitórios eletromagnéticos no intuito de representar o comportamento dos transformadores (KEMA, 1988; MORCHED, 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.

#### 4.2.1 Considerações para a Modelagem do Transformador

Segundo (MARTINEZ et al., 2005a) a modelagem do transformador pode ser separada em duas partes, a representação dos enrolamentos e a 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 do núcleo são: a saturação, o efeito de histerese e as correntes induzidas. Para Martinez et al. (2005a), 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 da ferro-ressonância<sup>17</sup>, 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.

<sup>14</sup> Chama-se *histerese* o fato de o momento magnético do material ser diferente depois do campo ter sido removido, ou o fato de o estado magnético do material ser função de sua história magnética (HAYT JR., 1983).

<sup>15</sup> Corrente induzida são as correntes geradas pela variação do fluxo magnético no núcleo de ferro. Chamam-se também de correntes de Foucault ou correntes eddy (HAYT JR., 1983).

<sup>16</sup> Efeito pelicular (*Skin effect* em inglês) é um efeito caracterizado pela repulsão entre linhas de corrente magnética, criando a tendência de essa fluir na superfície do condutor elétrico.

<sup>17</sup> Ferro-ressonância: o termo infere uma condição de ressonância em um circuito de corrente alternada contendo capacitâncias e indutâncias, no qual o campo magnético do indutor está concentrado em um núcleo de ferro.

Nesse contexto (MARTINEZ et al., 2005a) 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<sup>18</sup> 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 junção desses materiais dielétricos e as partes sob 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).

Segundo (ADIELSON, 1981), sugere-se que as capacitâncias sejam incluídas nos modelos de transformadores da seguinte forma:

- entre os enrolamentos próximos ao núcleo e o núcleo ( $C_a$ ).
- entre quaisquer dois enrolamentos ( $C_b$ ).
- através de cada enrolamento, do início do enrolamento até seu fim ( $C_c$ ).

As capacitâncias geralmente estão fisicamente distribuídas ao longo de todo o enrolamento. No entanto, Adielson (1981) salienta que melhores resultados podem ser obtidos representando-os através de parâmetros concentrados. Como é mostrado na Figura 4.1, pode-se representar a metade da capacitância para cada final de enrolamento relacionado aos itens (a) e (b) e uma capacitância total em paralelo com o enrolamento para contemplar o item (c).

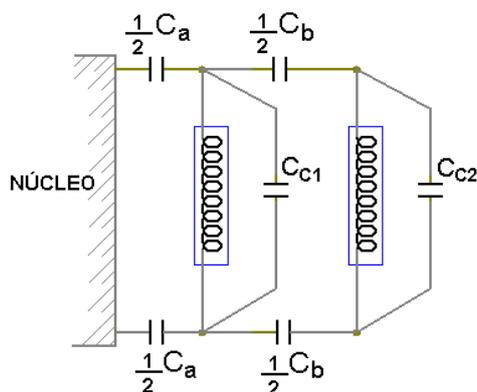


Figura 4.1: Adição das capacitâncias no transformador (ADIELSON, 1981).

Os modelos simplificados podem ser suficientemente precisos para a simulação de alguns transitórios. Por exemplo, há muitos transitórios de baixa frequência nos quais a

<sup>18</sup> kHz: kilo-Hertz.

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 ou 3 pode ser suficiente (MARTINEZ et al., 2005a).

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.

### 4.3 Faixa 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 o desempenho dos sistemas de proteção, fato que gera a necessidade do estudo da 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.

Quando se projeta um sistema de proteção é muito importante conhecer a origem do fenômeno eletromagnético, como também a faixa de frequências na qual ele pode ser identificado (RIES, 2007). Sendo assim, na Tabela 4.1 são apresentados os fenômenos transitórios que normalmente acontecem em SEP, identificando a faixa de frequências nas quais os sinais transitórios apresentam-se (POVH et al., 1993).

Tabela 4.1: Origem dos transitórios e suas frequências associadas (POVH et al., 1993).

<b>Evento</b>	<b>Faixa de Frequência</b>
Energização de transformadores e ferro-ressonância	(DC) 0,1 Hz – 1 kHz
Rejeição de carga	0,1 kHz – 3 kHz
Falta clara	50/60 Hz – 3 kHz
Falta inicial	50/60 Hz – 20 kHz
Energização de linha	50/60 Hz – 20 kHz
Re-energização de linha	(DC) 50/60 Hz – 20 kHz
Tensão de restabelecimento transitória:	
Faltas em terminais	50/60 Hz – 20 kHz
Faltas em linhas curtas	50/60 Hz – 100 kHz
Fechamento múltiplo de disjuntor	10 kHz – 1 MHz
Surto atmosférico e faltas em subestações	10 kHz – 3 MHz
Chaves de faltas GIS ( <i>Gás Insulated Switchgear</i> )	100 kHz – 100 MHz

(MARTINEZ et al., 2005a) salienta que, no caso particular da proteção de transformadores, deve ser levado em conta que esse equipamento apresenta determinadas características de comportamento para cada faixa de frequência. Por isso, o modelo de transformador a ser utilizado na análise do sistema de proteção tem que ser escolhido adequadamente para que possa representar corretamente as características dessa máquina nas frequências envolvidas com os eventos analisados. Segundo (MARTINEZ et al., 2005a) 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 em conjunto (bancos de capacitores, linhas de transmissão e distribuição) são dados necessários para a análise da ocorrência desses fenômenos transitórios. Já para as frequências altas (acima de 10 kHz), os efeitos capacitivos são relevantes no comportamento do transformador e o modelo da máquina deve representar esses efeitos. Nessa faixa, as não-linearidades e os efeitos dependentes da frequência dos materiais empregados na construção do transformador não têm uma grande influência na modelagem podendo ser desconsiderados segundo (MARTINEZ et al., 2005a).

#### 4.4 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.

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

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

- a) **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<sup>19</sup>. O problema da incondicionalidade tem sido adequadamente resolvido em simulações de transitórios, subtraindo o fluxo comum no cálculo das indutâncias próprias e mútuas. De fato, a subtração de uma grande quantidade de indutância própria e mútua é equivalente ao uso direto das indutâncias de dispersão.

- b) **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.
- c) **Modelagem baseada no princípio da dualidade:** estas aproximações foram introduzidas por (CHERRY, 1949) e aqui o núcleo de ferro pode ser modelado com muita precisão. No entanto, modelos baseados apenas nessa abordagem têm o inconveniente de as indutâncias de dispersão não serem corretamente representadas, 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.
- d) **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.
- e) **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. A análise de campo tridimensional é muitas vezes necessária no processo de projeto. Esses métodos não são práticos para o cálculo de transitórios, já que o tempo de simulação é muito longo.

#### 4.4.2 Outros Critérios de Classificação Utilizados

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

- a) **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.

---

<sup>19</sup> Que não tem restrições, ou seja, não está sujeita a nenhuma condição.

- b) **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.
- c) **Tipo de parâmetros:** é muito importante diferenciar os parâmetros constantes daqueles dependentes da frequência, já que cada um deles determina uma modelagem diferente.
- d) **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, acredita-se 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. Diante disso, um desenvolvimento mais detalhado desses critérios será apresentado a seguir.

## 4.5 Modelagem em Função da Faixa de Frequência

A modelagem do transformador pode ser feita compreendendo todas as faixas de frequência ou apenas uma faixa específica (JANUARIO, 2007). Como foi exposta anteriormente, a modelagem do transformador para todas as faixas de frequência é difícil, devido principalmente à presença de uma grande variedade de tipos construtivos de núcleos e enrolamentos. Também ao fato de que alguns parâmetros do transformador são não-lineares e, ainda, seu comportamento fica sujeito à variação da frequência. Isso dificulta a correta modelagem de um transformador através de um modelo completo, já que este requer que tanto os enrolamentos quanto o núcleo magnético sejam claramente representados. Além disso, o modelo válido para toda a faixa do espectro de frequências tem que considerar os acoplamentos próprios e mútuos induzidos pelos elementos capacitivos e indutivos do transformador para o qual se precisa conhecer a configuração física.

No trabalho de (JANUARIO, 2007) uma completa descrição dos modelos utilizados para simulação de transitórios eletromagnéticos em uma ampla faixa de frequências é desenvolvida. Januario (2007) divide as faixas de frequência da seguinte forma:

- Baixas frequências: frequências até a frequência industrial de 50-60 Hz.
- Médias frequências: compreendendo as faixas entre 50-60 Hz até dezenas de kHz (quilohertz).
- Altas frequências: faixas de frequências acima de 10 kHz.

No decorrer desta seção será apresentado um resumo das abordagens utilizadas na modelagem do transformador segundo vários autores (JANUARIO, 2007; MARTINEZ et al., 2005b; YACAMINI et al., 1994; CHEN et al., 1997; entre outros).

#### 4.5.1 Modelagem do Transformador para Baixas e Médias Frequências

(MARTINEZ et al., 2005a) apresenta uma revisão dos principais modelos de transformadores para simulação de transitórios nas faixas de baixa e média frequências. Nesse trabalho, destaca-se que a modelagem do transformador pode ser separada em duas partes: a representação dos enrolamentos e a representação do núcleo de ferro. Os enrolamentos possuem características lineares, enquanto que o núcleo possui características não-lineares e ainda ambas as partes possuem parâmetros que dependem da frequência.

Os modelos apresentados por Martinez et al. (2005a) são classificados em três grupos. O primeiro grupo baseia-se na determinação de uma matriz impedância ou em uma matriz admitância. O segundo grupo é uma extensão do modelo de componente saturável de transformadores multifásicos. Ambos os tipos de modelos podem ser construídos em programas de transitórios eletromagnéticos tipo ATP/EMTP e ambos apresentam limitações na simulação de determinados tipos de núcleos. Já os modelos baseados na topologia do núcleo constituem o terceiro e maior grupo.

##### *Primeiro Grupo: representação por matrizes (modelo BCTRAN)*

As equações de regime permanente para transformadores polifásicos com diversos enrolamentos podem ser expressas através da matriz impedância:

$$[V] = [Z] \cdot [I] \quad (4.1)$$

Para a simulação de transitórios, essa equação deve ser reescrita da seguinte forma:

$$[V] = [R] \cdot [i] + [L] \cdot [di / dt] \quad (4.2)$$

Nessa equação, [R] e [L] representam a matriz de resistências e impedâncias de [Z], respectivamente, cujos elementos podem ser determinados através de testes de excitação. O termo  $[di/dt]$  é a matriz que representa a variação temporal das correntes.

Essa representação inclui o acoplamento entre fases e as características terminais do modelo. No entanto, não considera as diferentes topologias do núcleo e dos enrolamentos.

Os cálculos realizados com as equações, acima apresentadas, podem trazer problemas quanto à precisão dos mesmos visto que a matriz impedância [Z] pode se tornar mal condicionada para correntes pequenas de excitação ou quando essas correntes são ignoradas.

Para resolver esse problema, pode-se reescrever a equação (4.1) para uma representação através da matriz admitâncias, da forma seguinte:

$$[I] = [Y] \cdot [V] \quad (4.3)$$

onde [Y] sempre existe e os seus elementos podem ser obtidos diretamente de testes padrões de curto-circuito. Para estudos de transitórios, [Y] deve ser dividido em seus componentes resistivos e indutivos.

O transformador pode ainda ser modelado pela equação de estado:

$$[di / dt] = [L]^{-1}[v] - [L]^{-1}[R][i] \quad (4.4)$$

Cabe salientar que todos esses modelos são lineares. Entretanto, para muitos estudos de transitórios é necessário incluir os efeitos de saturação e histerese. Os efeitos da corrente de excitação podem ser linearizados e incluídos na descrição matricial, que podem levar a erros quando o núcleo satura. Alternativamente, a excitação pode ser omitida a partir da representação matricial e adicionada externamente aos terminais do modelo sobre a forma de elementos não-lineares, como mostrado na Figura 4.2. Esse modelo é chamado BCTRAN no *software* ATP/EMTP.

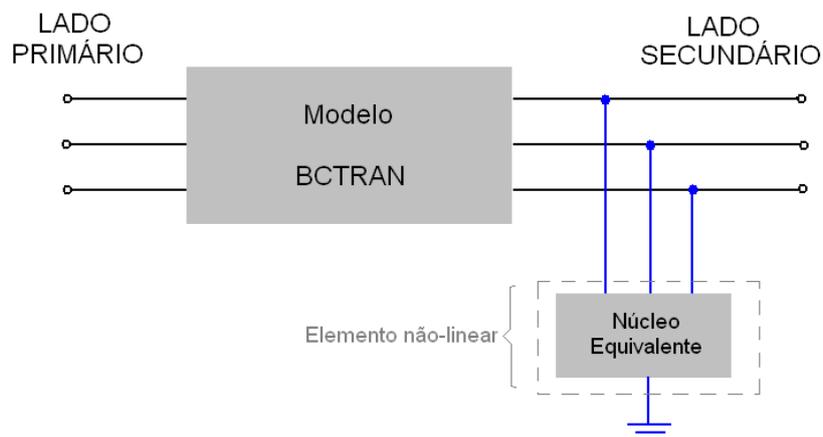


Figura 4.2: Modelo BCTRAN com núcleo magnético anexado externamente.

Essa representação do transformador nem sempre é a mais correta topologicamente. No entanto, em muitos casos de estudo, ela já é suficiente. Apesar de essa representação ser teoricamente válida somente para frequências em que os dados de placa foram obtidos, eles possuem uma precisão adequada para frequências abaixo de 1 kHz (MARTINEZ et al., 2005a).

### ***Segundo Grupo: modelo incluindo a saturação (modelo STC)***

Este modelo é conhecido como STC (*Saturable Transformer Component*) no software de simulação de transitórios ATP/EMTP. O enrolamento primário do transformador é considerado como um circuito RL<sup>20</sup> desacoplado. No caso de transformadores multifásicos, as outras fases são tratadas como se possuíssem um transformador com dois enrolamentos. A Figura 4.3 mostra a configuração considerada nessa modelagem.

<sup>20</sup> Chama-se circuito RL um circuito elétrico série composto por resistências (R) e indutâncias (L).

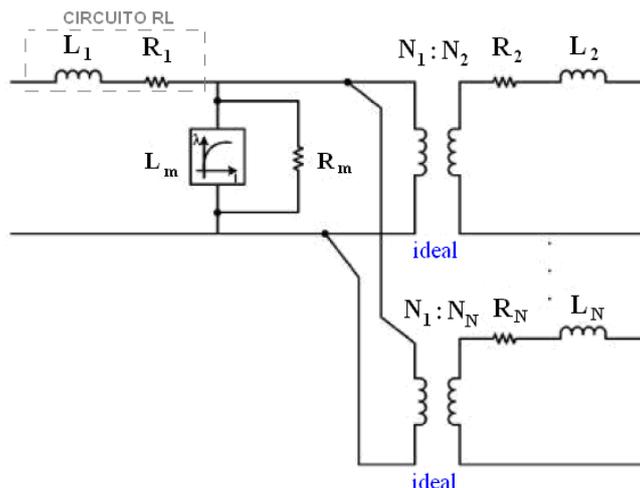


Figura 4.3: Modelo incluindo a saturação (modelo STC no ATP/EMTP).

A equação de um transformador monofásico com  $N$  enrolamentos excluindo o núcleo, tem a mesma forma da equação (4.4). Entretanto, o produto da matriz  $[L]^{-1}[R]$  é simétrico, o que não representa corretamente o caso mais genérico, onde esse produto não é simétrico. Note também que, nesse modelo, tanto os efeitos da saturação quanto os efeitos da histerese são incluídos na modelagem através da adição de um indutor não-linear em um nó fictício interno ao transformador representados na Figura 4.3 pelos elementos  $L_m$  e  $R_m$ .

Segundo (MARTINEZ et al., 2005a) esse modelo pode ser estendido para o caso de unidades trifásicas através da adição de um parâmetro de relutância de seqüência zero, mas a sua utilidade é muito limitada. Além disso, o mesmo autor salienta que esse modelo não pode ser utilizado para transformadores com mais de três enrolamentos, visto que o circuito não é válido para essa configuração. Outra limitação dessa modelagem é que a indutância de magnetização  $L_m$  e a resistência  $R_m$  em paralelo estão conectadas a um nó interno ao transformador, o que nem sempre é a topologia correta, e para o estudo de transformadores com três enrolamentos foram encontrados problemas de instabilidade numérica.

### ***Terceiro Grupo: modelo baseado na topologia***

Neste grupo encontram-se os modelos que consideram a topologia tanto do núcleo quanto dos enrolamentos. (MARTINEZ et al., 2005a) classifica esses modelos em dois grandes sub-grupos, a saber:

**A) Modelos baseados no princípio da dualidade:** são modelos baseados em circuitos magnéticos sem apresentar qualquer descrição matemática. Através do princípio da dualidade pode-se determinar um circuito elétrico equivalente topologicamente correto através de um modelo de circuito magnético (CHERRY, 1949). O uso dessa metodologia resulta em modelos que consideram:

- o efeito da saturação em cada seção do núcleo do transformador,
- o acoplamento magnético entre as fases,
- os efeitos de dispersão.

No circuito magnético equivalente, os enrolamentos aparecem como fontes de forças magnetomotrices (FMM), os caminhos de dispersão aparecem como relutâncias lineares e os núcleos ferromagnéticos aparecem como relutâncias com saturação. As equações de malha e nós são equivalentes às do modelo elétrico. Para

que esses modelos sejam úteis na prática, as fontes de corrente resultantes da transformação são substituídas por transformadores ideais para que haja isolamento entre o circuito primário e secundário do modelo. Essa representação ainda promove acoplamento ao núcleo e preserva a vinculação entre o número de espiras no primário e no secundário. As relações entre espiras são escolhidas de forma que os parâmetros do núcleo sejam referentes ao enrolamento de baixa tensão. A porção do modelo que fica dentro dos transformadores de acoplamento representa o núcleo e as dispersões. Tanto as resistências do enrolamento quanto a interconexão dos mesmos aparecem externamente aos transformadores de acoplamento, o que faz com que as funções equivalentes do núcleo sejam independentes da configuração dos enrolamentos. As perdas no núcleo e os efeitos de acoplamento capacitivo não são obtidos diretamente através da transformação do circuito magnético em um circuito elétrico. No entanto, todos esses parâmetros podem ser adicionados à rede elétrica equivalente obtida. A Figura 4.4 ilustra um transformador e o seu equivalente, baseado no princípio da dualidade.

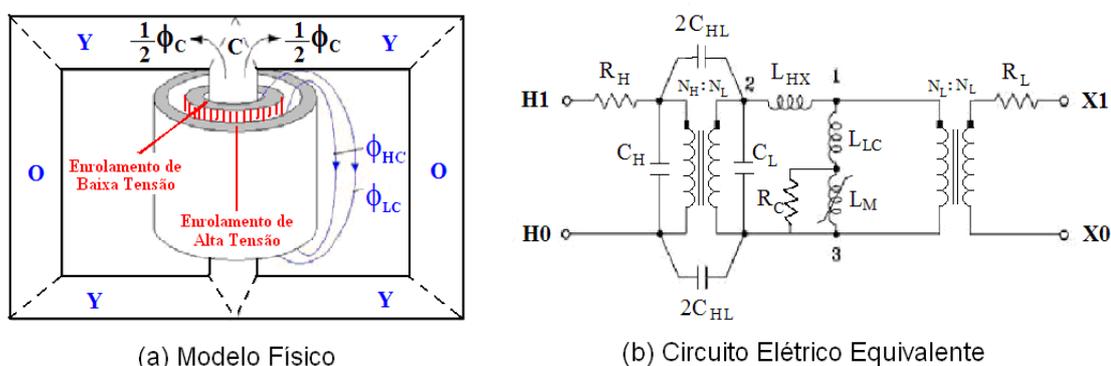


Figura 4.4: Modelo do transformador baseado no princípio da dualidade.

Na Figura 4.4(a) é ilustrado o fluxo concatenado  $\phi_c$  junto ao fluxo disperso pelos enrolamentos de baixa tensão  $\phi_{LC}$  e de alta tensão  $\phi_{HC}$ . Já na Figura 4.4(b) é feita a representação do circuito dual desse transformador, no qual o fluxo disperso é modelado como indutâncias lineares  $L_{HX}$  e  $L_{LC}$  e o fluxo concatenado é representado como uma indutância não-linear  $L_M$ . As perdas do núcleo e dos enrolamentos de alta e baixa tensão são representadas, respectivamente, pelas resistências  $R_C$ ,  $R_H$  e  $R_L$ . As capacitâncias entre os enrolamentos são representadas por  $C_{HL}$  e as capacitâncias entre os terminais de alta e baixa tensão são representadas por  $C_H$  e  $C_L$ . Cabe salientar que esses modelos estão presentes no *software* ATP/EMTP sob o nome de “modelo híbrido do transformador”.

- B) Modelos geométricos:** modelos de transformadores topologicamente corretos também podem ser derivados da seguinte equação:

$$[v] = [R] \cdot [i] + [d\lambda / dt] \quad (4.5)$$

Na equação (4.5) as características elétricas e magnéticas são relacionadas considerando a topologia do núcleo, onde  $[v]$  é a matriz que representa as tensões nos terminais,  $[R]$  é a matriz resistência,  $[i]$  é a matriz das correntes e  $[d\lambda/dt]$  é a matriz de variação temporal dos fluxos concatenados. Nessa abordagem, qualquer tipo de configuração de transformadores pode ser modelado e a principal diferença entre cada um dos modelos é a maneira como são obtidas as equações magnéticas.

Além da representação mostrada aqui, outras formas de representação dos modelos geométricos são encontradas nos trabalhos de (YACAMINI et al., 1994), (CHEN et al., 1997).

#### 4.5.2 Modelagem do Transformador para Altas Frequências

O estudo de fenômenos envolvendo sinais de altas frequências em circuitos que contêm transformadores é muito difícil pelo fato de não ser conhecido um modelo que represente completa e adequadamente o comportamento do transformador nessas faixas de frequências. Os modelos descritos na literatura que representam os transformadores frente aos transitórios rápidos (acima de alguns quilohertz) omitem ou representam superficialmente o comportamento não-linear do ramo magnetizante, ainda que cada modelo possua uma característica específica de aplicabilidade. Mesmo assim, um grande número de modelos de transformadores para estudos de fenômenos de alta frequência tem sido desenvolvido nos últimos anos (VAESSEN, 1988; ADIELSON et al., 1981; DE LEON et al., 1993; DE LEON et al., 1994; MORCHED et al., 1993). Embora alguns desses modelos apresentem boa exatidão, há ainda inúmeros problemas em termos de eficiência, estabilidade numérica e requerimentos para aquisição de dados.

Segundo (JANUARIO, 2007) os modelos de transformadores para altas frequências podem ser classificados da seguinte maneira:

- Modelos tipo caixa preta (*Black-Box*):
  - ✓ Baseados na análise modal.
  - ✓ Descrição através de pólos e zeros.
- Modelos físicos:
  - ✓ Modelos de linha de transmissão com  $n$  fases.
- Modelos detalhados:
  - ✓ Modelos baseados na indutância própria e mútua.
  - ✓ Modelos baseados na geometria.
  - ✓ Modelos baseados na topologia.
- Modelos híbridos:
  - ✓ Combinação do modelo caixa preta com o modelo físico.

Além dessa classificação, ainda é possível adicionar nessa faixa de frequências os seguintes tipos de modelos:

- Modelos Simplificados.
- Modelos Completos.

Uma descrição mais detalhada tanto dos modelos apresentados acima quanto de outros tipos de abordagens pode ser encontrada em bibliografias específicas que fazem um desenvolvimento teórico mais detalhado dos modelos para altas frequências (MORCHED et al., 1993). Porém, será apresentada a seguir uma breve descrição dos modelos de transformadores segundo a classificação proposta por (JANUARIO, 1997).

### Modelo tipo Caixa Preta (Black-Box)

Esta modelagem é uma das mais encontradas na literatura atual, pelo fato de o transformador ser estudado como uma “caixa preta” e a análise ser feita considerando só as informações obtidas a partir dos terminais da máquina. Nessa abordagem, uma função de transferência precisa ser definida e as características construtivas do transformador não são levadas em consideração, fato que torna a modelagem mais simples. Os dados obtidos nos ensaios podem ser de tensão, corrente e impedância em função da frequência.

Uma forma de representar a modelagem tipo caixa preta é através de quadripolos<sup>21</sup>, como mostra a Figura 4.5. Nessa representação, a tensão  $V_1$  e corrente  $I_1$  são consideradas dados de entrada e a tensão  $V_2$  e corrente  $I_2$  são dados de saída.



Figura 4.5: Representação do transformador através de um quadripolo.

Nesse caso uma função de transferência do tipo  $H(s)$  é definida pela equação (4.6) como sendo: a tensão de saída  $V_2$  dividida pela tensão de entrada  $V_1$ , ambas aplicadas sobre um quadripolo em função da frequência.

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_0}{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + b_{m-2} s^{m-2} + \dots + b_0} \quad (4.6)$$

Os valores dos coeficientes  $a_i$  e  $b_i$  são a ordem do polinômio do numerador e do denominador e são parâmetros a serem determinados.

### Modelos baseados na análise modal

O trabalho de (KEMA et al., 1988), baseado na análise modal<sup>22</sup> define dois possíveis caminhos para projetar o modelo que descreve o comportamento do transformador em função das altas frequências. Esses caminhos são: 1) *uma descrição mecânica* do transformador pode ser utilizada para calcular as reatâncias e capacitâncias que juntas constituem o modelo e 2) *um método experimental*, onde algumas medições são realizadas sobre o transformador e, a partir desses resultados, a função de transferência e de admitâncias são calculadas.

Segundo (KEMA et al., 1988) as estruturas mecânicas podem ser caracterizadas pela resposta da estrutura a uma determinada excitação. A resposta da estrutura mecânica perante uma excitação aplicada com  $a(s)$  frequência(s) de ressonância(s) é dita *mode shapes* e pode ser utilizada para a modelagem do transformador utilizando a abordagem de uma caixa preta. Nesse sentido, a resposta de qualquer ponto  $z$  da estrutura mecânica do transformador pode ser calculada quando há uma excitação arbitrária qualquer.

<sup>21</sup> Um *quadripolo* é uma estrutura com dois acessos, um de entrada e outro de saída. Muitos equipamentos, dispositivos e configurações podem ser representados por quadripolos.

<sup>22</sup> A *análise modal* é utilizada para determinar um modelo de transformador para altas frequências que possa ser utilizado em programas de transitórios eletromagnéticos como ATP/EMTP, permitindo que vários tipos de transformadores possam ser modelados.

Assim, a função de transferência no local  $z$  para um sistema com  $M$  frequências de ressonância é definido como sendo:

$$H(z, j\omega) = A_0(z) + \sum_{K=1}^M A_K(z) \cdot \frac{-w^2 + j\omega 2\delta_K}{w_K^2 - w^2 + j\omega 2\delta_K} \quad (4.7)$$

onde  $A_k(z)$  é uma função *mode shapes*, ou seja, a resposta da estrutura mecânica do transformador à frequência de ressonância  $w_k$  com um fator de amortecimento  $\delta_k$ .

A análise modal é utilizada para estudar a distribuição de tensões sobre os enrolamentos do transformador, fato que exige o cálculo das funções *mode shapes* em vários pontos dos enrolamentos. Portanto, para cada ponto acessível do transformador<sup>23</sup>, a função transferência (4.7) pode ser escrita como:

$$\frac{V_2}{V_1} = H(j\omega) = \gamma - \sum_{K=1}^M \frac{A_K w_K^2}{w_K^2 - w^2 + j\omega 2\delta_K} \quad (4.8)$$

onde  $\gamma$  é chamado índice de transferência capacitiva (equação 4.9) e  $A_k$  é a amplitude da  $k$ -ésima função *mode shapes* calculada nesse terminal.

$$\gamma = A_0 + \sum_{K=1}^M A_K \quad (4.9)$$

A resposta de tensão do transformador, dita  $Y(j\omega)$ , para uma excitação  $X(j\omega)$  é dada pela seguinte equação:

$$Y(j\omega) = H(j\omega)X(j\omega) \quad (4.10)$$

Nesse contexto, todos os terminais do transformador, com exceção de dois, são aterrados através de uma impedância  $Z$  e, assim, uma caixa preta com quatro terminais e duas portas (uma de entrada e uma de saída) é definida, como se pode ver na Figura 4.6.

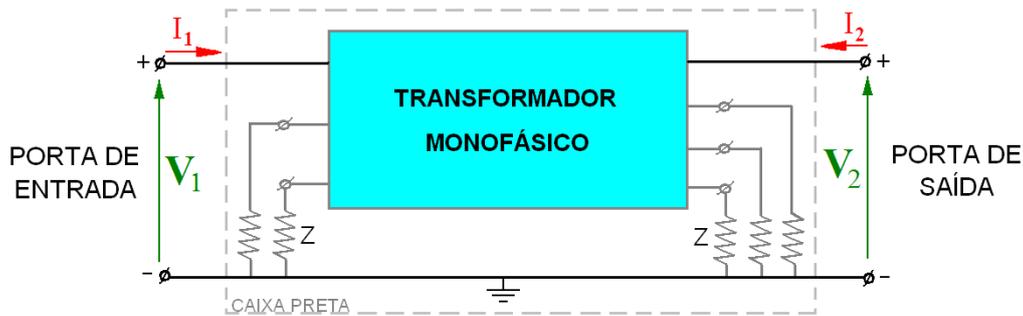


Figura 4.6: Configuração tipo caixa preta proposta por Kerma et al. (1998).

Na modelagem proposta por (KEMA et al., 1988) o modelo monofásico proposto não considera o efeito da saturação do núcleo do transformador. A admitâncias do lado de alta tensão do transformador em condições a vazio (sem carga) é dada pela seguinte equação:

$$\frac{I_1}{V_1} = Y(j\omega) = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{j\omega L_0} + j\omega C_0 + \sum_{K=1}^M \frac{j\omega C_K w_K^2}{w_K^2 - w^2 + j\omega 2\delta_K} \quad (4.11)$$

Na equação (4.11) a frequência de ressonância  $M$  e os fatores de amortecimento são os mesmos que os da equação (4.8). Os valores de  $R_0$ ,  $L_0$  e  $C_0$  são agregados nessa

<sup>23</sup> Geralmente, um transformador somente é acessível através dos seus terminais.

equação para considerar as perdas no núcleo de ferro, a indutância em condições a vazio e a capacitância de entrada. Então, para uma completa representação modal do transformador, quatro parâmetros para cada frequência de ressonância têm que ser especificados, além dos valores para  $\gamma$ ,  $R_0$ ,  $L_0$  e  $C_0$ . A Figura 4.7 ilustra o modelo modal que tem o comportamento em frequência especificado pelas funções de transferência e admitâncias descritas em (4.8) e (4.11).

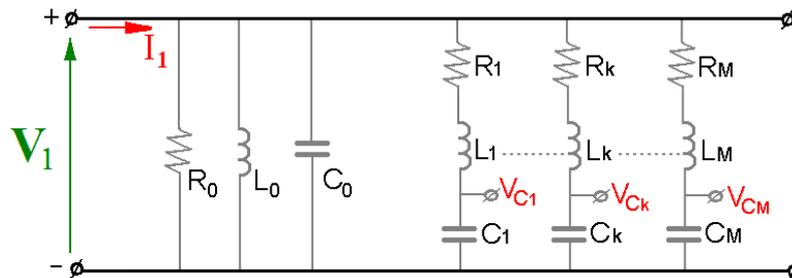


Figura 4.7: Modelo modal do transformador de quatro terminais da Figura 4.6.

#### Modelos baseados na descrição de pólos e zeros

(MORCHED et al., 1993) propõem um modelo de transformador baseado na característica em frequências da matriz admitâncias, obtida entre os terminais do transformador e para uma dada faixa de frequências. Os elementos da matriz admitância nodal são aproximados através de funções racionais constituídas de parte real, bem como de pólos e zeros complexos conjugados. As aproximações são realizadas sob a forma de um circuito RLC em uma topologia adequada para uso direto no ETP/EMTP.

Considere um transformador polifásico com multi-enrolamentos. A equação nodal que relaciona as tensões e correntes num terminal acessível do transformador pode ser expressa como:

$$[Y] \cdot [V] = [I] \quad (4.12)$$

onde a matriz nodal de admitâncias  $[Y]$  é uma matriz complexa, simétrica e dependente da frequência. Em um sistema trifásico, a equação (4.12) pode ser expressa como:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m1} & Y_{m2} & \dots & Y_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$[Y_{ij}] = \begin{bmatrix} y_{ij,aa} & y_{ij,ab} & y_{ij,ac} \\ y_{ij,ba} & y_{ij,bb} & y_{ij,bc} \\ y_{ij,ca} & y_{ij,cb} & y_{ij,cc} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

onde  $[Y_{ij}]$  é uma sub-matriz  $3 \times 3$  e  $m$  é o número de terminais trifásicos em consideração.

Por exemplo, a matriz  $[Y]$  para um transformador trifásico de dois enrolamentos conectados em uma configuração Y-Y com neutro aterrado pode ser uma matriz de ordem 6, com  $3m \cdot (3m+1)/2 = 21$  elementos distintos. Os elementos da matriz nodal de admitâncias podem ser obtidos através de medições ou podem ser calculados a partir de um modelo detalhado dos enrolamentos em uma determinada faixa de frequências.

A idéia básica por trás dessa modelagem do transformador apresentada por (MORCHED et al., 1993) é produzir um circuito equivalente, cuja matriz admitância

nodal corresponda à matriz admitância nodal do transformador original ao longo da faixa de frequência de interesse. Essa representação poderia reproduzir corretamente a resposta transitória do transformador em seus terminais. Considere o circuito polifásico ilustrado na Figura 4.8 a seguir. Esse circuito é designado como um circuito  $\pi$  equivalente multi-terminal.

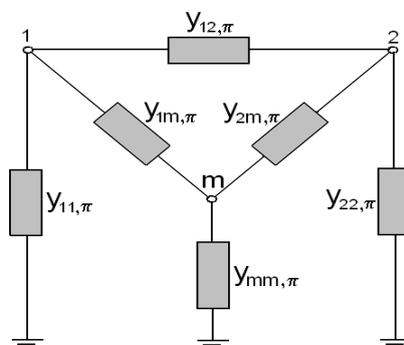


Figura 4.8: Diagrama unifilar de um circuito  $\pi$  equivalente multi-terminal.

Os parâmetros desse circuito podem ser calculados através de sua matriz de admitâncias nodal utilizando as equações já conhecidas:

$$[Y_{ij, \pi}] = \sum_{j=1}^m [Y_{ij, \pi}] \quad (4.15)$$

$$[Y_{ij, \pi}] = -[Y_{ij}] \quad (4.16)$$

Os elementos de  $[Y_{ij, \pi}]$  são aproximados com funções racionais, as quais contêm elementos reais e pólos e zeros complexos conjugados. A função racional pode então ser realizada através de um circuito RLC, o qual combina (4.15) e (4.16) para produzir os parâmetros do circuito equivalente  $\pi$ , e reflete o comportamento da característica em frequência da matriz admitância do transformador.

Outros trabalhos que abordam a modelagem tipo caixa preta podem ser encontrados nas pesquisas feitas por (KANASHIRO et al., 2004), (ZANETTA JR. et al., 2002), (HASMAN, 2002), (MILLER, 2002), (SHEHN et al., 2005).

### Modelos Físicos

(JANUARIO, 2007) apresenta uma breve descrição sobre a modelagem de transformadores através de modelos físicos. Esse autor salienta que, segundo (RAHIMPOUR et al., 2003) a modelagem de transformadores através desses modelos baseia-se em aspectos como a geometria dos enrolamentos, as propriedades físicas dos materiais e os conjuntos de circuitos equivalentes do transformador.

Nesse contexto, (HERSZTERG, 2004) propõe que o transformador seja modelado como se fosse uma linha de transmissão longa, dado o fato da natureza distribuída de seus parâmetros. A análise baseia-se no estudo das oscilações de tensão no transformador quando os enrolamentos são considerados como linhas de transmissão monofásicas. As constantes, distribuídas ao longo da geometria dos enrolamentos, são utilizadas para a análise das características de alta frequência do transformador.

Januario (2007) também apresenta a modelagem proposta por (CABRAL, 2003), na qual se utiliza o modelo baseado no método TLM (*Transmission Line Modeling*) para estudar a distribuição e a transferência de surtos de tensão nos enrolamentos do

transformador. Nesse trabalho, o enrolamento contínuo do transformador é representado pela associação série de segmentos elementares, assim como os dois segmentos ilustrados na Figura 4.9. Os parâmetros detalhados na Figura 4.9 são calculados utilizando dados construtivos e a disposição dos enrolamentos dentro do transformador.

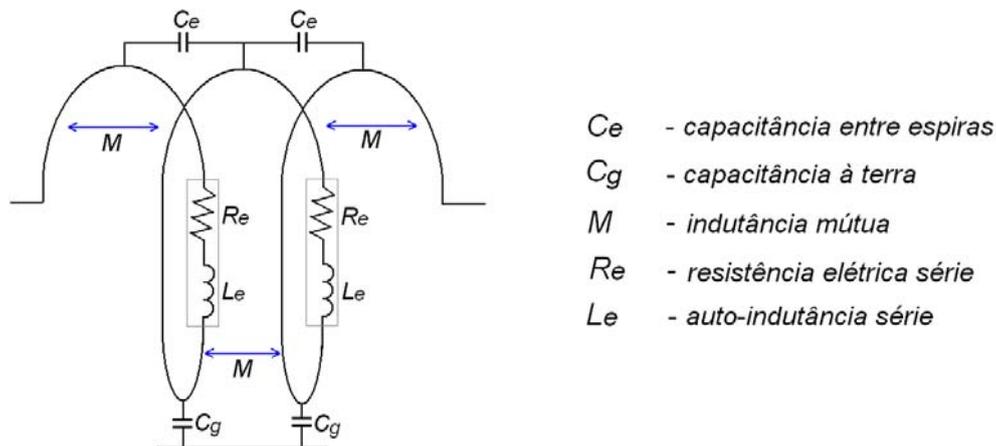


Figura 4.9: Segmento genérico entre duas espiras de um enrolamento contínuo.

### Modelos Detalhados

Também no trabalho de (JANUARIO, 2007) faz-se uma descrição dos modelos detalhados de transformadores propostos por alguns autores. Assim, o mesmo autor descreve inicialmente o modelo proposto por (RAHIMPOUR et al., 2003), no qual a modelagem baseia-se nas indutâncias próprias e mútuas através dos parâmetros distribuídos do transformador. Segundo Januario (2007), essa modelagem reproduz mais apropriadamente o comportamento do campo magnético, mas ainda algumas considerações são necessárias:

- O modelo detalhado tipo RLCM representado por resistor, indutâncias próprias e capacitâncias e indutância mútuas é determinado exclusivamente pelas dimensões geométricas do enrolamento, além de ser válido desde alguns kHz até 1 MHz.
- A descrição baseada na geometria dos enrolamentos do transformador possibilita uma descrição simples das falhas que acontecem no dielétrico do enrolamento e permite a localização da falta.

O circuito equivalente proposto por (RAHIMPOUR et al., 2003) para a modelagem do transformador através das indutâncias próprias e mútuas é ilustrado na Figura 4.10 a seguir.

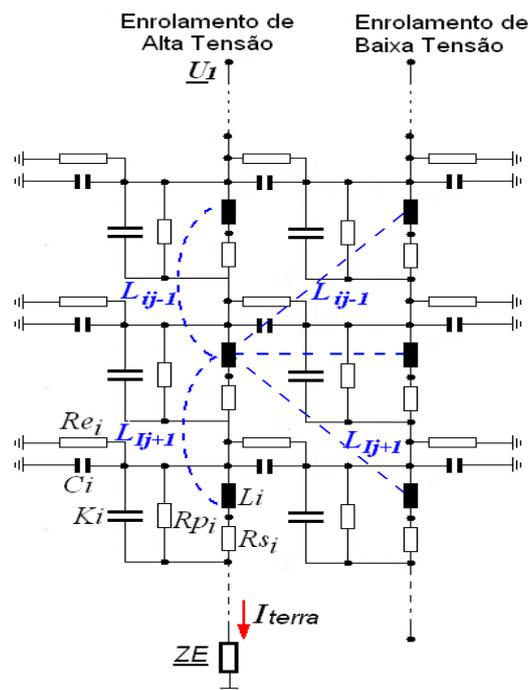


Figura 4.10: Modelo detalhado proposto por Rahimpour et al. (2003).

Outra modelagem apresentada no trabalho de Januario (2007) é proposta por (NODA et al., 2002) na qual os parâmetros utilizados no modelo são determinados através de medições da resposta em frequência dos terminais do transformador. Essa abordagem exige o conhecimento da disposição topológica dos enrolamentos dentro do transformador. A Figura 4.11 apresenta o modelo proposto por (NODA et al., 2002).

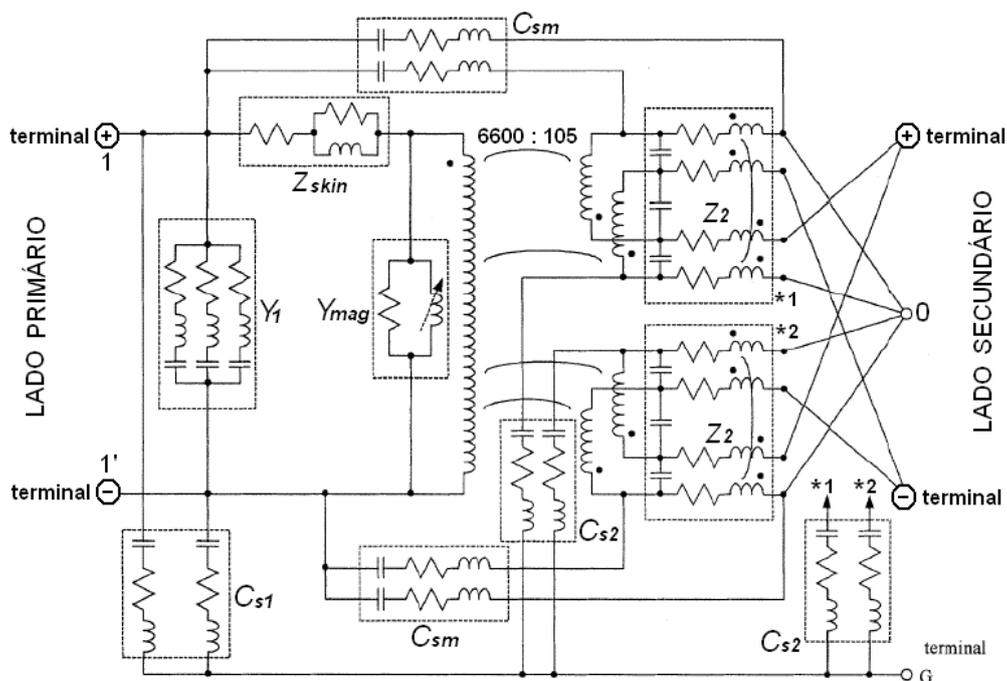


Figura 4.11: Modelo do transformador proposto por Noda et al. (2002).

Além dos modelos apresentados anteriormente, existem outros modelos detalhados, propostos por (CHEN et al., 1997), (KEZUNOVIC et al., 2000).

### Modelos Simplificados

O trabalho de (CHIMKLAI et al., 1995) apresenta um modelo simplificado para altas frequências de transformadores trifásicos com dois e três enrolamentos. O modelo baseia-se no circuito equivalente clássico de 60 Hz, estendido para altas frequências pela adição das capacitâncias dos enrolamentos e a substituição do ramo de curto circuito dependente da frequência por um circuito equivalente RLC<sup>24</sup>. Para manter a forma do modelo clássico é possível separar a dependência da frequência por uma capacitância *shunt* em série de valor constante. No trabalho de (CHIMKLAY et al., 1995) o circuito clássico tipo ‘T’ de 60 Hz é utilizado para modelar a interação indutiva e capacitiva entre as colunas pertencentes à mesma fase (colunas montadas sobre a mesma perna do núcleo) de transformadores mono, bi e trifásicos. A modelagem no nível da bobina apresenta duas vantagens topológicas importantes em relação à abordagem  $[Y(\omega)]$ :

- a modelagem do ramo dependente da frequência pode ser separada da modelagem dos braços *shunt* (capacitâncias *stray*<sup>25</sup> constantes e braço de magnetização).
- a representação é independente das conexões entre os enrolamentos (estrela, delta, etc.)

Como resultado da topologia simplificada, o problema da modelagem dependente da frequência fica reduzido à montagem de uma função impedância simples (a impedância de curto-circuito). Assim, as funções a serem montadas são menores e mais simples do que as funções obtidas com a formulação  $[Y(\omega)]$ . A Figura 4.12 mostra o modelo em banda larga proposto para um par de bobinas acopladas a um transformador. A parte (a) ilustra o *circuito original* e a parte (b) mostra o *circuito equivalente*.

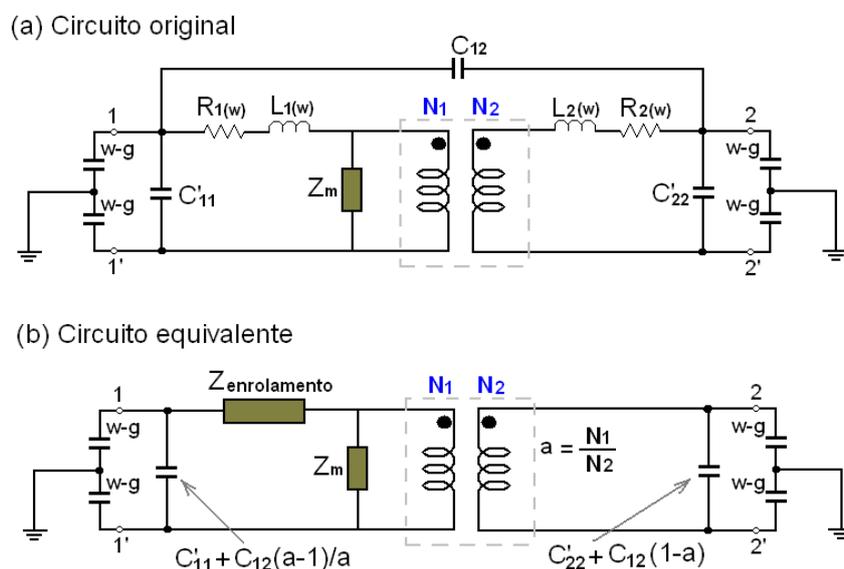


Figura 4.12: Modelo simplificado proposto por Chimklai et al., (1995).

<sup>24</sup> Circuito RLC é entendido como um circuito elétrico formado por resistências, indutâncias e capacitâncias.

<sup>25</sup> Em rigor de verdade a Capacitância *Stray* não existe, pois se aproveita o efeito capacitivo que qualquer junção elétrica apresenta para usá-la como se fosse um capacitor. A capacitância *stray* é frequentemente fonte de distúrbios em projetos, pois introduz um componente “fantasma” no circuito, invisível mas atuante.

As capacitâncias *stray* são conectadas nos terminais exteriores do circuito. Dessa maneira, a parte interna do modelo é exatamente igual a do modelo convencional para 60 Hz. A impedância série  $Z_{\text{enrolamento}}$  mostrada na Figura 4.12(b), inclui a resistência série equivalente  $R_{1(\omega)}$  (perdas que dependem da corrente) e a indutância de dispersão equivalente  $L_{1(\omega)}$  (fluxo de dispersão próprio e mútuo) dos enrolamentos em combinação com a capacitância entre os enrolamentos do lado primário e secundário  $C_{12}$ .

### **Modelos Completos**

Segundo (JANUARIO, 2007) a modelagem completa do transformador requer que os enrolamentos sejam claramente representados, bem como os acoplamentos mútuos, indutivos e capacitivos. Na sua dissertação de mestrado, (JANUARIO, 2007) também descreve os modelos propostos por (DE LEON et al., 1994) e (POPOV et al., 2001) os quais serão descritos a seguir.

O trabalho de (DE LEON et al., 1994) apresenta uma modelagem mais completa de transformadores trifásicos para cálculos de transitórios eletromagnéticos. Utiliza-se nessa abordagem um conjunto de equações de estado resolvidas com a regra trapezoidal de integração a fim de obter o circuito equivalente de Norton nos terminais do transformador. As principais características dessa modelagem são:

- Os elementos básicos para o cálculo dos parâmetros do modelo (indutâncias e capacitâncias) são as espiras do enrolamento, de modo que as ressonâncias internas são consideradas nessa abordagem.
- Incluem-se as perdas por correntes induzidas (*eddy*) nos enrolamentos.
- A saturação e o amortecimento produzido pelas correntes de *eddy* no núcleo de ferro (laminado) são representados.
- A solução iterativa das equações de estado é obtida em forma dissociada para os enrolamentos, núcleo de ferro e quedas de tensão devido a correntes nos enrolamentos.

Esse modelo completo baseia-se em duas abordagens: o princípio da dualidade e a indutância de dispersão. As perdas devido às correntes induzidas nas lâminas do material ferromagnético e nos enrolamentos são representadas através de circuitos dependentes da frequência. A magnetização do núcleo é considerada e modelada como uma função não-linear entre o fluxo e a corrente e as capacitâncias entre o enrolamento e terra são determinadas a partir de cálculos analíticos utilizando dados construtivos. O transformador é descrito como um conjunto de equações de estado, algumas das quais são não-lineares, que são resolvidas iterativamente em uma forma dissociada.

No trabalho de (POPOV et al., 2001), outra modelagem completa do transformador é apresentada. Agora, o modelo é determinado a partir da resposta em frequência da impedância dos terminais de entrada e dos dados construtivos. Nesse, o efeito não-linear do material ferromagnético e o ramo magnetizante são modelados por parâmetros dependentes da frequência. As ressonâncias que se apresentam são devido às capacitâncias e indutâncias encontradas na estrutura do equipamento, se considerado como um todo. As demais ressonâncias que se apresentam no transformador são representadas por um conjunto de parâmetros concentrados do tipo RLCG (resistor, indutor, capacitor e admitância).

## 4.6 Modelagem em Função do Tipo de Representação

Alguns parâmetros dos transformadores são não-lineares e/ou dependentes da frequência, principalmente pela presença de três efeitos: Saturação, Histerese e Correntes de Foucault. A saturação e a histerese provocam distorção na forma de onda dos sinais e, ainda, a histerese junto às correntes de Foucault geram perdas no núcleo do transformador. Desses três efeitos presentes nos transformadores, a saturação é o efeito mais predominante, sendo que as correntes de Foucault e o fenômeno de histerese só influem em alguns transitórios (MARTINEZ et al., 2005a).

### 4.6.1 Modelagem do Núcleo de Ferro

O comportamento do núcleo de ferro geralmente é representado pela curva de magnetização que caracteriza a relação entre a densidade de fluxo magnético  $[B]$  e a intensidade de campo magnético  $[H]$ . A intensidade do campo magnético  $[H]$  esta associada a possíveis magnetizações as quais foi submetido o material ferromagnético, fato que torna a modelagem da curva de magnetização um tanto complicada. Diante disso, para caracterizar completamente o comportamento do material do núcleo do transformador, o modelo empregado tem que ser capaz de representar as diversas curvas magnéticas associadas ao material. A Figura 4.13 ilustra esquematicamente diversas curvas de magnetização e laços de histerese de um determinado material.

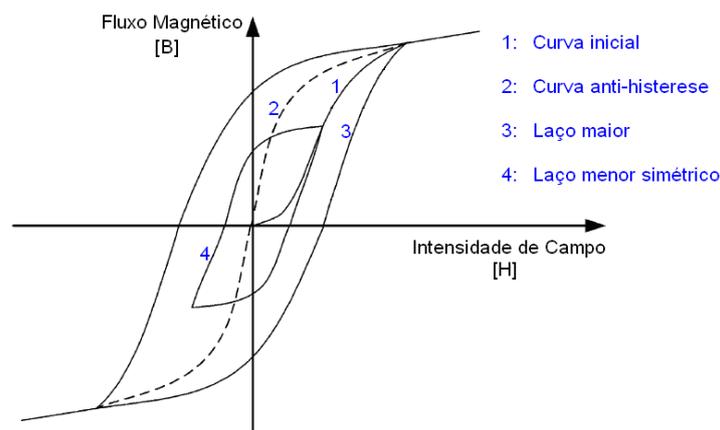


Figura 4.13: Curvas de magnetização e laços de histereses genéricos.

O laço de histerese é o maior laço possível apresentado quando há saturação técnica de um material (RIES, 2007). Qualquer outro laço fechado é dito laço menor e pode ser simétrico ou assimétrico. A saturação magnética do núcleo pode ser representada pela curva anti-histerese, a qual representa a relação  $B-H$  quando não existe histerese no material.

Segundo (MARTINEZ et al., 2005a), a característica de saturação pode ser modelada por dois termos polinomiais relacionando a corrente magnetizante  $i$  com o fluxo concatenado  $\lambda$  através da seguinte equação:

$$i = a \cdot \lambda + b \cdot \lambda^p \quad (4.17)$$

Quando ocorre a simulação de transitórios, a característica de saturação, modelada segundo a equação (4.17), se representa por uma indutância linear com duas inclinações (polinômio de ordem dois). Para estudos que consideram a ferrorressonância precisa-se de uma representação mais exata da característica de saturação, pois a ordem  $p$  do

polinômio expresso na equação (4.17) aumenta. A menor ordem do polinômio pode ser utilizada para a região acima do joelho de saturação, que é quase linear.

### Modelagem da Histerese

O fenômeno da histerese pode ser provocado por várias causas, sendo a mais dominante aquela dependente do material. A aproximação mais prática é proveniente de modelos que utilizam curvas ajustadas que ignoram o comportamento magnético do material.

Durante os últimos anos foram utilizados modelos macroscópicos baseados nos fenômenos físicos predominantes. A maior dificuldade em relação aos modelos macroscópicos é a complexidade e a determinação dos parâmetros relacionados à descrição do mecanismo de magnetização. Um método para representar o modelo “Preisach” baseado num maior laço de histerese é proposto por (NAIDU, 1990).

Na simulação transitória, o núcleo de ferro sem histerese pode ser representado pelo circuito equivalente mostrado na Figura 4.14 a seguir. O circuito é similar ao circuito de um indutor linear, porém a resistência  $R$  depende do valor do parâmetro ‘ $p$ ’ dado na equação (4.17), que representa a inclinação de operação adotada pelo indutor. Como se trata de um indutor não-linear, o valor de  $p$  muda constantemente, demandando uma triangulação parcial da matriz de condutância nodal.

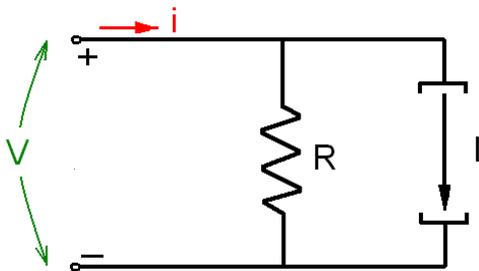


Figura 4.14: Modelo do núcleo de ferro sem histerese.

Já a Figura 4.15 mostra outra modelagem do núcleo de ferro no qual a saturação é representada pelo indutor anti-histerese  $L_m$  e as perdas são modeladas pelo resistor não-linear  $R_m$ . As perdas de excitação são principalmente perdas no núcleo de ferro e consistem em perdas por histerese, correntes de Foucault e outras. Adiciona-se ainda um capacitor  $C_w$  para representar a capacitância entre espiras do enrolamento. Esse parâmetro pode não ter efeitos sobre a maioria dos transitórios de baixa frequência (MARTINEZ et al., 2005a).

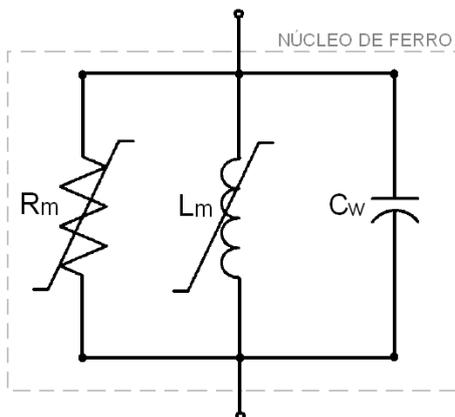


Figura 4.15: Modelo do núcleo de ferro com saturação e perdas.

### ***Modelagem das Correntes de Foucault***

Vários dos fenômenos magnéticos considerados críticos para a operação do transformador acontecem simultaneamente, o que resulta em uma distribuição não uniforme das correntes nos enrolamentos, assim como do fluxo magnético no núcleo de ferro (AVILA-ROSALES et al., 1993). Esse fato faz com que os efeitos da corrente de Foucault tenham influência tanto nos enrolamentos quanto no núcleo do transformador.

#### Modelagem dos efeitos da corrente de Foucault nos Enrolamentos

Os efeitos da corrente de Foucault se manifestam como um incremento na resistência efetiva e nas perdas do enrolamento, se comparado às que se apresentam para corrente direta (KENNEDY, 1998). Existe um número alto de expressões analíticas para o cálculo das perdas no enrolamento. Estas, deduzidas por (DE LEON et al., 1993), estão baseadas nas seguintes suposições: “o campo magnético tem só uma componente axial paralela ao eixo do enrolamento; o condutor tem uma seção transversal retangular; todos os condutores têm a mesma corrente total; não existe diferença entre os condutores; e a intensidade de campo superficial é considerada imperturbável pelas correntes de Foucault”. Essa suposição implica que o campo magnético da superfície lateral dos condutores é conhecido e pode ser utilizado para especificar a condição-limite. O circuito equivalente de Foster, mostrado na Figura 4.16, tem que ser usado para representar a dependência dos enrolamentos à frequência. Esse circuito tem que ser de ordem infinita para que possa reproduzir exatamente a impedância em todas as frequências, porém um circuito computacionalmente eficiente pode ser obtido pela instalação de apenas algumas frequências pré-estabelecidas. Segundo (MARTINEZ et al., 2005a), para estudo práticos, um circuito série de ordem três ou menor é suficiente.

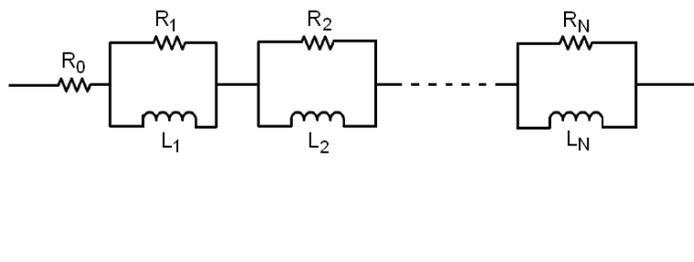


Figura 4.16: Circuito equivalente série de Foster para enrolamentos.

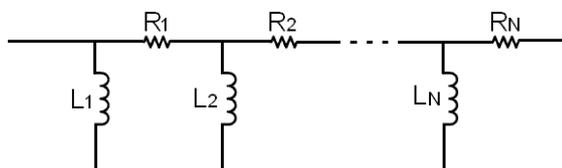
#### Modelagem dos efeitos da corrente de Foucault no Núcleo de Ferro Laminado

Uma mudança no campo magnético provoca a indução de correntes de Foucault no núcleo. Como consequência disso, a densidade do fluxo será menor que aquela que foi dada pela curva de magnetização normal, mostrada na Figura 4.13. A distribuição do fluxo no núcleo de ferro laminado altera-se com a mudança da frequência. Para as altas frequências, o fluxo será confinado a uma fina camada próxima à superfície de laminação, cuja espessura diminui à medida que a frequência aumenta. Isso indica que o caminho de ferro pode ser representado através de indutâncias e resistências de magnetização que mostram que as perdas das correntes de *eddy* são dependentes da frequência (AVILA-ROSALES et al., 1993). A circulação das correntes de Foucault introduz perdas adicionais. Para limitar essas perdas, o núcleo do transformador é construído a partir de várias lâminas paralelas. Os modelos de correntes de Foucault destinados à simulação das indutâncias de magnetização dependentes da frequência, bem como das perdas, podem ser classificadas segundo duas categorias obtidas respectivamente pela realização de uma expressão analítica para a impedância de

magnetização, como uma função dependente da frequência ou pela subdivisão das lâminas em sub-lâminas e geração do seu equivalente elétrico.

Modelos computacionais muito eficientes foram obtidos através da aplicação de um circuito dual de Cauer obtido através de uma sintetização do circuito equivalente de Foster. A Figura 3.17 ilustra o circuito proposto por Cauer.

a) Circuito padrão de Foster



b) Circuito dual de Foster

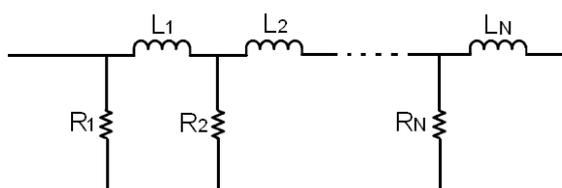


Figura 4.17: Circuito equivalente de Cauer para o núcleo de ferro. a) Circuito padrão de Cauer, b) Circuito dual de Cauer.

#### 4.6.2 Modelagem Linear e Não-Linear do Transformador

As características magnéticas e elétricas dos transformadores fornecem os dados necessários para desenvolver modelos matemáticos adequados para a predição do desempenho a níveis aceitáveis de carga. Basicamente, há quatro características dominantes que são requeridas para a representação adequada do transformador: perdas no cobre devido à resistência dos enrolamentos, perdas no núcleo de ferro devido aos efeitos da histerese e das correntes de Foucault, fluxo de dispersão através dos enrolamentos e características de magnetização do núcleo. Enquanto a magnetização do núcleo é a fonte primária de não-linearidades do transformador, todos os efeitos acima são significativos. Existem vários métodos para a modelagem do transformador e a maioria deles ignoram os efeitos não-lineares. Desde que um determinado modelo não ignore nenhuma das quatro características dominantes, uma precisão razoável é geralmente obtida para os componentes fundamentais de todas as tensões, correntes e potências no máximo nível de carga (GREENE et al., 1988). No trabalho de (GREENE et al., 1988), apresenta-se um *modelo linear de transformadores* que mostra-se eficiente. A Figura 4.18 ilustra o modelo apresentado por Greene et al., (1988).

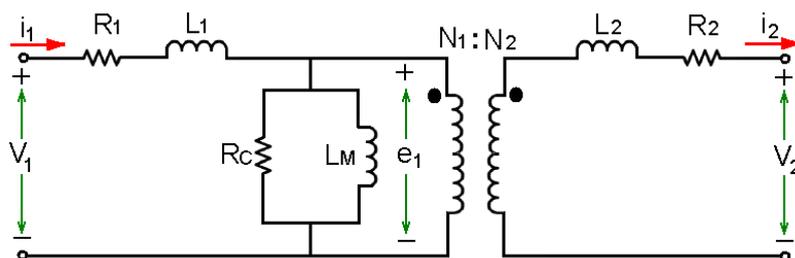


Figura 4.18: Modelo linear do transformador proposto por Greene et al. (1988).

Segundo (GREENE et al., 1988) a maioria dos modelos não-lineares de transformadores requer muitas informações físicas e elétricas o que os torna pouco práticos para muitas aplicações. No entanto, há modelos fáceis de utilizar, como por exemplo, o modelo de núcleo saturável do programa de transitórios (EMTP). Esses modelos consideram que a característica de magnetização é não-linear e ignora qualquer outra não linearidade, bem como a dependência das perdas no núcleo com a frequência e os efeitos no enrolamento do transformador. Greene et al., (1988) propõem duas abordagens para a modelagem não-linear do transformador os quais serão apresentadas a seguir.

### ***Abordagem no domínio da frequência***

As perdas totais no núcleo do transformador podem ser determinadas a partir da seguinte equação:

$$P_{fe} = P_h + P_e = K_h B^s f + K_e B^2 f^2 \quad (4.18)$$

onde  $P_h$  e  $P_e$  são as perdas por histerese e por correntes de Foucault respectivamente,  $K_h$  e  $K_e$  são constantes,  $B$  é o valor máximo da densidade de fluxo magnético,  $f$  é a frequência de excitação, e  $s$  é o expoente de Steinmetz o qual adota valores entre 1,5 até 2,5 dependendo do tipo de aço utilizado no núcleo do transformador.

Se a tensão que produz o fluxo no núcleo é sinusoidal com magnitude  $E_{rms}$  e frequência  $f$ , a equação (4.18) pode ser reescrita como:

$$P_{fe} = k_h f^{1-s} E^s + k_e E^2 \quad (4.19)$$

onde  $k_h \neq K_h$  e  $k_e \neq K_e$ .

Embora a aplicação do princípio de superposição seja incorreta para o circuito não-linear, em alguns casos uma linearização pode ser empregada para aproximar a solução. Então, se o princípio de superposição é aplicado a (4.19), as perdas no núcleo devido às componentes harmônicas individuais podem ser preditas. De fato, os elementos admitâncias podem ser definidos no modelo tanto para as perdas por histerese como para as perdas por correntes de Foucault, dividindo (4.19) pelo quadrado da tensão  $rms$  de cada harmônica, definindo então, duas condutâncias  $G_h$  (representando as perdas por histerese) e  $G_e$  (representado as perdas por correntes de Foucault) como:

$$G_h = k_h f^{1-s} E^{s-2} \quad (4.20)$$

$$G_e = k_e \quad (4.21)$$

Então, a característica de magnetização do transformador pode ser escrita por um polinômio que expressa a corrente de magnetização  $i_M$  em termos do fluxo concatenado  $\lambda$  no núcleo:

$$i_M = A_0 + A_1 \lambda + A_2 \lambda^2 + A_3 \lambda^3 + \dots \quad (4.22)$$

Dois circuitos modelos desenvolvidos com base nessa abordagem, modelos não-lineares 1 e 2, são ilustrados nas Figuras 3.19 e 3.20 a seguir. As pequenas caixas em série com os elementos que representam as perdas por histerese são filtros ideais que permitem que apenas as componentes harmônicas especificadas da corrente  $i_h$  fluam até o  $G_h$  apropriado. A análise do modelo 1 é particularmente simples, dado que a excitação é a tensão aplicada sobre o núcleo shunt. Já a análise do modelo 2 pode ser mais

complicada pelo fato de que  $V_1 \neq e$ , e a análise prossegue iterativamente assumindo na primeira iteração que  $e = V_1$ .

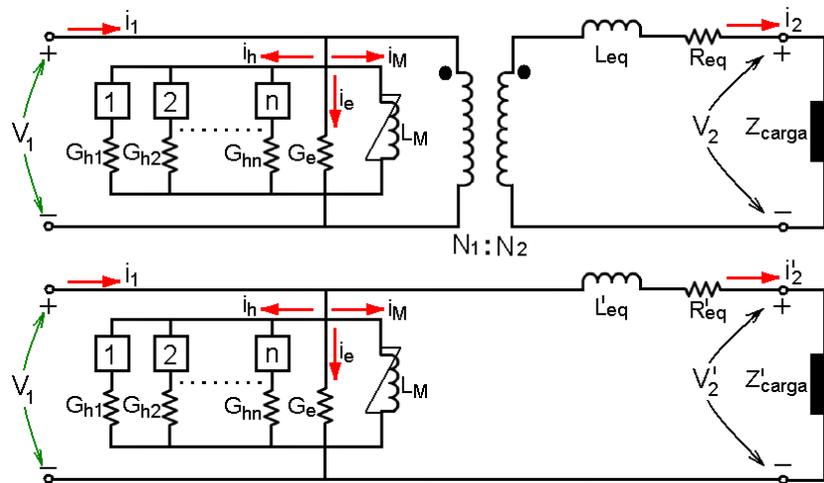


Figura 4.19: Modelo não-linear 1 (GREENE et al., 1988).

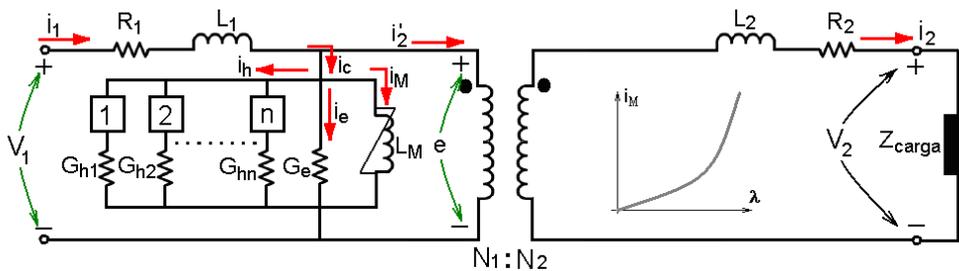


Figura 4.20: Modelo não-linear 2 (GREENE et al., 1988).

### Abordagem no domínio do Tempo

Uma segunda abordagem, apresentada por Greene et al., (1988), desenvolve um modelo propício para uma análise completa no domínio tempo. Esse modelo elimina a necessidade relativa à superposição, mas é complicado pelo fato de necessitar uma boa representação no tempo do núcleo não-linear do transformador. O núcleo é modelado por um laço  $i$ - $\lambda$ , como mostrado na Figura 4.21, o qual considera todos os efeitos do núcleo: perdas por histerese, perdas por correntes de Foucault, e magnetização.

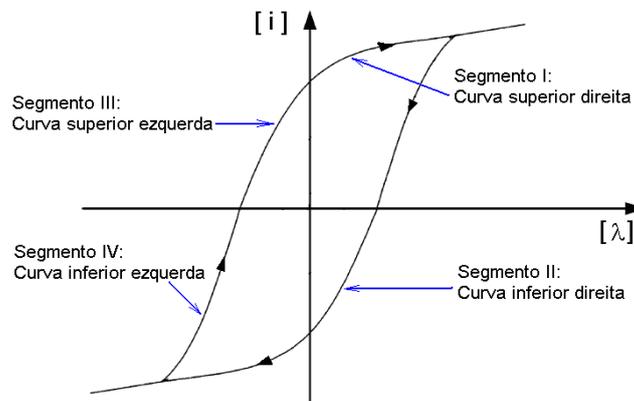


Figura 4.21: Laço de Histerese para a modelagem no tempo (GREENE et al., 1988).

As expressões utilizadas para descrever os laços ilustrados na Figura 4.21 são:

$$\begin{aligned}
 i &= A + Be^{C\lambda} && \text{segmento I} \\
 i &= D + Ee^{F\lambda} && \text{segmento II} \\
 i &= -D - Ee^{-F\lambda} && \text{segmento III} \\
 i &= -A - Be^{-C\lambda} && \text{segmento IV}
 \end{aligned}
 \tag{4.23}$$

Existe ainda uma dificuldade maior na abordagem no domínio tempo. Para um valor fixo de fluxo máximo concatenado,  $\lambda_{max}$ , o laço é facilmente determinado experimentalmente. Contudo, para valores variáveis de  $\lambda_{max}$  o laço não somente muda de tamanho como também na forma. Já que essas mudanças na forma são particularmente difíceis de prever, a abordagem escolhida ignora a variação da forma e assume que os câmbios no tamanho do laço são lineares. Isto equivale a escalar as características nas direções  $\lambda$  e  $i$  para diferentes valores de  $\lambda_{max}$ . O modelo não-linear no domínio tempo é ilustrado na Figura 4.22.

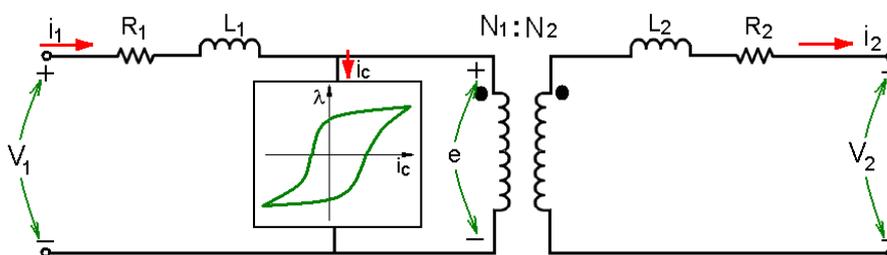


Figura 4.22: Modelo não-linear no domínio tempo (GREENE et al., 1988).

## 4.7 Resumo

Neste capítulo, foram apresentados os principais modelos para a modelagem de transformadores quando do estudo de transitórios eletromagnéticos em SEP. As características mais importantes referentes ao comportamento do transformador perante fenômenos transitórios foram desenvolvidas.

Uma classificação dos fenômenos transitórios em função da faixa de frequência foi apresentada, salientando aqueles relacionados ao transformador.

Uma descrição dos critérios comumente utilizados para classificar os modelos de transformadores foi feita. Além disso, um desenvolvimento dos modelos em função da frequência foi exposto.

Por fim, uma descrição dos modelos segundo o tipo de representação linear e não-linear foi logo apresentada.

## 5 METODOLOGIA DE PROTEÇÃO PROPOSTA

### 5.1 Introdução

O campo de aplicação da Transformada Wavelet em Sistemas Elétricos de Potência tem abrangido um grande número de tópicos. Sua aplicação nas áreas de Proteção de Sistemas Elétricos e Qualidade de Energia têm sido amplamente pesquisadas.

Assim, a aplicação da Transformada Wavelet quando da proteção de máquinas elétricas, especialmente na proteção diferencial de transformadores de potência, tem conseguido resolver muitos problemas encontrados na metodologia de proteção diferencial tradicional. A técnica mostra-se ainda como uma poderosa ferramenta matemática de análise para estudos que envolvem transitórios eletromagnéticos.

O presente capítulo tem por objetivo apresentar uma nova metodologia para proteção diferencial de transformadores de potência baseada na análise Wavelet. A criação de um algoritmo de aplicação direta para um relé digital que discrimine rápida e eficientemente uma condição de falta é o objetivo principal do desenvolvimento deste trabalho.

Dessa forma, na seção 5.2 deste capítulo introduz-se a abordagem utilizada no projeto do algoritmo de proteção proposto e apresenta-se uma descrição teórica da TW como ferramenta matemática de análise.

Na seção 5.3 é apresentada a fundamentação teórica básica que sustenta essa metodologia, assim como o esquema de decisão lógica utilizado pelo algoritmo de proteção proposto. Os critérios utilizados para a detecção e discriminação dos distúrbios são apresentados também nesta seção.

Por fim, na seção 5.4 é desenvolvida e apresentada a implementação computacional do algoritmo de proteção. É ainda exposta uma descrição da interface gráfica projetada para a simulação dos distúrbios estudados.

### 5.2 Abordagem Utilizada no Desenvolvimento do Trabalho

Os transformadores de potência são equipamentos muito importantes nos Sistemas de Energia Elétrica, intervindo significativamente no fornecimento de energia e na estabilidade da rede. A alta efetividade dos relés diferenciais utilizados na proteção de transformadores é indiscutível (GOMEZ-MORANTE et al., 1999). No entanto, o maior inconveniente dessa técnica deriva do seu alto potencial para operações incorretas (*false tripping*) causadas, entre outras, por correntes transitórias de magnetização (*inrush*) as quais acontecem quando da energização do transformador (HOROWITZ et al., 1995).

Os esquemas de proteção para transformadores de potência têm que considerar os efeitos da magnetização *inrush*. Isto se torna necessário porque as correntes de magnetização *inrush*, na maioria das vezes, resultam em valores 10 vezes superiores aos

valores das correntes de plena carga e, portanto, podem causar um funcionamento inadequado dos relés. A discriminação correta da magnetização *inrush* e das faltas internas tem sido reconhecida pelos engenheiros como um problema na proteção de transformadores (MAO et al., 2000). Há muitos esquemas de proteção propostos para mitigar esse problema e, entre eles, o esquema baseado no conteúdo de harmônicas é um de destaque (MONSEF et al., 2007). Essa metodologia utiliza a Transformada de Fourier para bloquear a operação do relé quando há corrente *inrush*, discriminando essa condição em função do conteúdo de segunda harmônica contida no sinal de corrente diferencial medida. Contudo, na medida em que os sistemas de transmissão aumentam tanto em complexidade quanto no nível de tensão e incrementa-se o uso de cabos subterrâneos, a produção de correntes de falta com um conteúdo de segunda harmônica comparável com as da corrente *inrush* é cada vez maior. O principal problema da Transformada de Fourier é que a sua aplicação assume que o sinal em análise é periódico e estacionário<sup>26</sup>, sendo que, em rigor de verdade, os distúrbios nos SEP, incluindo a corrente *inrush*, apresentam-se como um sinal não-estacionário, não-periódicos e de curta duração (MAGAHED et al., 2008). Esse fato acarreta uma diminuição na eficiência do sistema diferencial com restrição de harmônicos.

Por outro lado, deve-se reportar também que as componentes de segunda harmônica em correntes de magnetização *inrush* tendem a ser pequenas nos transformadores modernos, dadas as melhorias feitas no núcleo do equipamento. Sendo assim, a utilização da componente de segunda harmônica para discriminar correntes *inrush* deixa de ser confiável, além de apresentar desvantagens devido a uma lenta velocidade de funcionamento (VALSAN et al., 2008).

Este trabalho baseia-se na utilização da análise Wavelet para discriminar entre faltas internas, externas e correntes de *inrush*. A análise tradicional de Fourier estuda as frequências características da corrente *inrush* ao longo do tempo. Já a Transformada Wavelet localiza essas características em ambos os domínios de tempo e frequência. Assim, a análise Wavelet torna-se ideal para o estudo de sinais transitórios não-estacionários, obtendo uma melhor caracterização do sinal. Além disso, a TWD permite uma decomposição do sinal em diferentes níveis de resolução e a função base, dita *wavelet mãe*, é dilatada para baixas frequências e contraída para altas frequências. A mudança no comprimento da janela é utilizada para caracterizar determinadas componentes de frequência, sendo que são utilizadas as janelas dilatadas para obter componentes de baixa frequência do sinal, enquanto que janelas contraídas são usadas para obter as componentes de alta frequência (CASTILHO et al., 2005). Nesse contexto, este trabalho apresenta um esquema de proteção baseado na utilização da Transformada Wavelet para discriminar entre condições de falta (internas e externas) e correntes *inrush*. Aplica-se a Transformada Wavelet Discreta à forma de onda gerada pela perturbação, no intuito de decompor o sinal de corrente diferencial em várias faixas de frequência e permitir a localização no domínio tempo-frequência das características da mesma.

### 5.2.1 Visão Geral da Transformada Wavelet (TW)

Muitos fenômenos físicos, químicos ou elétricos podem ser descritos através de sinais no domínio do tempo. Quando um sinal é representado dessa forma, ele é considerado como uma função tempo-amplitude e a informação que se pode obter dessa

---

<sup>26</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.

representação não é sempre a mais completa, já que outras informações que o caracterizam podem ser mais bem observadas no domínio da frequência. Portanto, para uma melhor representação de um determinado sinal, é necessário dispor de sua representação no domínio tempo e no domínio da frequência (MARTINEZ et al., 2005b).

A Transformada de Fourier (TF) é a ferramenta matemática geralmente utilizada para passar um sinal do domínio tempo a uma representação no domínio da frequência. A TF, no entanto, não indica o tempo no qual determinadas componentes de frequência são inseridas no sinal, sendo essa informação não necessária quando do estudo de sinais de natureza estacionária mas é uma informação muito importante para sinais de natureza não-estacionária (CASTILHO et al., 2005).

Para resolver o problema da análise de sinais não-estacionários, surgiu a Transformada Rápida de Fourier (TRF), dita também Transformada de Fourier com Janelamento (WDFT). Essa divide o sinal não-estacionário em seções, nas quais se pode assumir que o sinal é estacionário (AGGARWAL; KIM, 2000). O sinal é ainda multiplicado por uma função janela, cujo comprimento deve ser igual à parte do sinal que é considerada estacionário. Além disso, a TRF permite conhecer a representação tempo-frequência do sinal, já que não só se conhece as componentes de frequência contidas no sinal, mas também se conhece a sua localização no tempo.

Com a TRF, o problema de análise de sinais não-estacionários e da representação tempo-frequência de um sinal é resolvido. No entanto, existe outro problema que desprende-se do Princípio de Incerteza de Heisenberg<sup>27</sup>. Esse princípio, levado ao contexto deste trabalho, discursa (RIOUL; VETTERLI, 1991): *“Não é possível conhecer a representação exata tempo-frequência de um sinal, mas sim os intervalos de tempo nos quais existem determinadas faixas de frequências”*. Esse princípio alerta para um problema que se relaciona com a resolução do sinal. Em consequência, aparece agora uma decisão de compromisso entre obter uma boa resolução no domínio do tempo ou uma boa resolução no domínio da frequência.

O problema da resolução tempo-frequência é o resultado do Princípio de Incerteza de Heisenberg e acontece seja qual for a transformada utilizada. No entanto, é possível analisar qualquer sinal utilizando uma técnica alternativa conhecida como Análise Multi-Resolução (AMR) (RIOUL et al., 1991). A Análise Multi-Resolução permite a decomposição de um sinal em diferentes faixas de frequência e com diferentes resoluções. Para faixas de altas frequências, a AMR fornece uma boa resolução temporal do sinal em contraposição a uma fraca resolução em frequência. Para as faixas de baixas frequências a AMR consegue uma boa resolução em frequência, em contraposição a uma fraca resolução temporal. Isso significa que uma determinada componente de alta frequência pode ser mais bem localizada no tempo (com menos erro relativo) que uma componente de baixa frequência. Pelo contrário, uma componente de baixa frequência pode ser localizada com melhor precisão no domínio da frequência, se comparada a uma componente de alta frequência. Essa análise se torna muito especial e útil quando os sinais a analisar apresentam componentes de alta frequência de curta duração (característicos dos distúrbios transitórios que se apresentam nos Sistema Elétricos de Potência) e componentes de baixa frequência de longa duração (MAGAHED et al., 2008).

Diante desse quadro, a técnica Wavelet surgiu como uma alternativa para superar os problemas de resolução da TRF, fazendo possível uma boa representação do sinal tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência em forma simultânea. Assim, é

---

<sup>27</sup> Werner Karl Heisenberg: físico alemão nascido em Würzburg em 1901. Laureado com dois prêmios Nobel em Física, é reconhecido como um dos fundadores da Mecânica Quântica

possível determinar o intervalo de tempo no qual acontecem determinadas componentes espectrais, fato de muito interesse na análise de sinais, como eletrocardiogramas, transitórios elétricos, etc. (LING et al., 1988).

A Transformada Wavelet filtra um sinal no domínio tempo através de filtros passa-baixos e passa-altos para eliminar algumas componentes de alta e baixa frequência do sinal. O procedimento repete-se novamente para os sinais resultantes do processo de filtragem anterior, ou seja, qualquer uma das saídas do filtro (geralmente a saída do filtro passa-baixos) ou ambas e se faz novamente a mesma divisão do sinal, criando uma operação dita “codificação por sub-bandas” (RIOUL et al., 1991). Esse procedimento é repetido até que o sinal é decomposto em um número pré-definido de vezes. Após esse procedimento, tem-se um conjunto de sinais que representam o sinal original, decomposto em faixas de frequências específicas.

As Transformadas Wavelet mais utilizadas em aplicações de análise de sinais podem ser divididas em três tipos: Transformada Wavelet Contínua (TWC), Transformada Wavelet Semi-Discreta (TWS) e Transformada Wavelet Discreta (TWD). A diferença entre esses tipos está determinada pela forma em que os parâmetros de *translação* e *escala* são discretizados (Anexo B).

A TWC se define como:

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{a,b}^*(t)dt \quad (5.1)$$

onde tem-se que:

$$\psi_{a,b}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (5.2)$$

Como se observa na equação anterior, o sinal é uma função de três variáveis,  $t$ ,  $b$  e  $a$ , os quais são os parâmetros de *tempo*, *translação* e *escala* respectivamente, e onde  $\psi_{b,a}(t)$  é a função de base dita “wavelet mãe”.

A Transformada Wavelet Discreta de um sinal  $f[n]$  discreto, por sua vez, é dada como:

$$C[j,k] = \sum_{n \in \mathbb{Z}} f[n]\psi_{j,k}[n] \quad (5.3)$$

Onde  $\psi_{j,k}$  é uma wavelet discreta definida como sendo:

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{-\frac{j}{2}} \cdot \psi[2^{-j}n - k] \quad (5.4)$$

Agora, os parâmetros  $b$  e  $a$ , são definidos segundo uma escala diádica, de forma que:  $b = 2^j$ ;  $a = 2^{jk}$ , e sendo o sinal em estudo um sinal discreto. Um desenvolvimento mais detalhado da teoria Wavelet é apresentado no Anexo B deste trabalho, no intuito de ampliar a sua abordagem para um melhor entendimento dessa ferramenta.

### 5.2.2 Construção da TW

A Transformada Wavelet Contínua pode ser avaliada computacionalmente de forma discreta. No entanto, ela não constitui uma transformada discreta, e sim uma série wavelet ou uma versão discreta da TWC (RIOUL et al., 1991). A desvantagem desse fato é que a informação entregue pela transformada é redundante para a reconstituição do sinal. Essa redundância se traduz em um aumento significativo do tempo computacional de cálculo. Neste trabalho se utiliza a Transformada Wavelet Discreta,

dado o fato que fornece suficiente informação para análise e para a reconstituição do sinal em estudo, apresentando uma maior facilidade de construção computacional.

A teoria wavelet dispõe de algoritmos para seu uso em computadores digitais. Em *softwares* como MatLab®, existem famílias de algoritmos baseados na Análise Multi-Resolução de Mallat (MALLAT, 1989), que são utilizados na decomposição digital de um sinal. O procedimento para obter a TWD começa pela passagem do sinal  $\mathbf{x}[\mathbf{n}]$  através de um filtro digital passa-baixos<sup>28</sup> de meia onda com resposta ao impulso  $\mathbf{h}[\mathbf{n}]$ . Esse processo de filtragem consiste em efetuar matematicamente a convolução do sinal com a resposta impulso do filtro, o qual pode ser definido como:

$$x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k] \cdot h[n-k] \quad (5.5)$$

Nesse análise, a *resolução* (medida da quantidade de detalhe do sinal) muda com cada uma das operações de filtragem, sendo que a variação da *escala* é feita mediante operações de sub-amostragem (RIOUL et al., 1991). A operação de sub-amostragem consiste em reduzir a taxa de amostragem do sinal e eliminar algumas amostras. Uma vez que o sinal tenha passado pelo filtro passa-baixos de meia onda, metade das amostras pode ser eliminada de acordo com o critério de Nyquist<sup>29</sup>. Com esse propósito, é eliminada uma de cada duas amostras (sub-amostragem de dois) para reduzir o número de pontos à metade e duplicar a escala do sinal (RIOUL et al., 1991).

O procedimento anterior pode ser expresso matematicamente como sendo:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h[k] \cdot x[2n-k] \quad (5.6)$$

A TWD analisa o sinal fazendo sua decomposição em Aproximações e Detalhes (níveis) e considerando diferentes bandas de frequência com distintas resoluções para cada nível. Com esse propósito se utilizam dois conjuntos de funções, chamadas funções de escalonamento e funções wavelet, as quais estão associadas aos filtros passa-baixos e passa-altos respectivamente. A decomposição do sinal em diferentes faixas de frequências é obtida mediante um processo de filtragem sucessivo do sinal através de filtros passa-baixos  $g[n]$  e passa-altos  $h[n]$  de média banda, o que matematicamente pode ser expresso por:

$$\begin{aligned} y_{high}[k] &= \sum_n x[n] \cdot g[2k-n] \\ y_{low}[k] &= \sum_n x[n] \cdot h[2k-n] \end{aligned} \quad (5.7)$$

Nessas equações,  $y_{high}[k]$  e  $y_{low}[k]$  são as saídas dos filtros passa-altos e passa-baixos respectivamente, depois da etapa de sub-amostragem.

A Figura 5.1 ilustra um exemplo desse procedimento, onde  $\mathbf{x}[\mathbf{n}]$  é o sinal original que vai ser decomposto e  $\mathbf{h}[\mathbf{n}]$  e  $\mathbf{g}[\mathbf{n}]$  são os filtros passa-baixos e passa-altos, respectivamente. Em cada nível de decomposição a largura de faixa do sinal aparece sinalizada na figura como sendo  $\mathbf{f}$  e a sub-amostragem do sinal fica representada nessa figura como  $2\downarrow$ .

<sup>28</sup> Um filtro passa-baixos elimina todas as frequências que ficam acima da metade da maior frequência do sinal. Já um filtro passa-altos elimina todas as frequências por baixo da metade de maior frequência do sinal.

<sup>29</sup> Critério de Nyquist: um sinal precisa ser amostrado pelo menos duas vezes em cada ciclo de variação, isto é, a frequência de amostragem (frequência de Nyquist) precisa ser no mínimo o dobro da maior frequência presente no sinal.

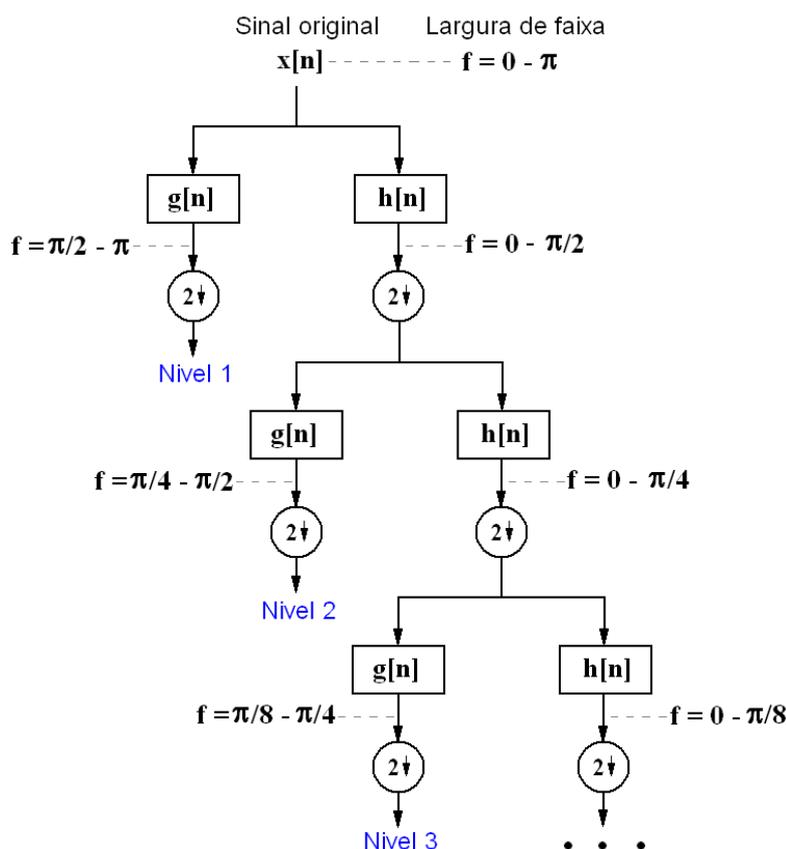


Figura 5.1: Diagrama de filtragem do sinal (decomposição).

### 5.3 Projeto do Algoritmo de Proteção

Propõe-se neste trabalho, o desenvolvimento de um algoritmo de proteção que possa ser utilizado como uma sub-rotina de operação dentro da configuração de um relé convencional. Com esse critério, a identificação e discriminação eficiente entre faltas internas e correntes *inrush* no transformador são feitas a partir da análise dos sinais provenientes das correntes trifásicas diferenciais obtidas através dos Transformadores de Corrente (TCs). A técnica proposta baseia-se na análise das componentes de detalhe associadas aos fenômenos transitórios que ocorrem no transformador de potência.

O relé diferencial convencional **RC**, ilustrado na Figura 5.2, utilizaria o algoritmo proposto como uma sub-rotina de decisão. Nesse, perante o acontecimento de um distúrbio (falta interna, externa ou corrente *inrush*) o relé enviará um sinal de abertura ou restrição aos interruptores **I** em função da análise feita pelo algoritmo de proteção proposto neste trabalho.

Na Figura 5.2 ilustra-se esquematicamente o circuito de proteção diferencial monofásico, sendo que em uma situação real a técnica proposta utiliza as medições das três correntes diferenciais do transformador.

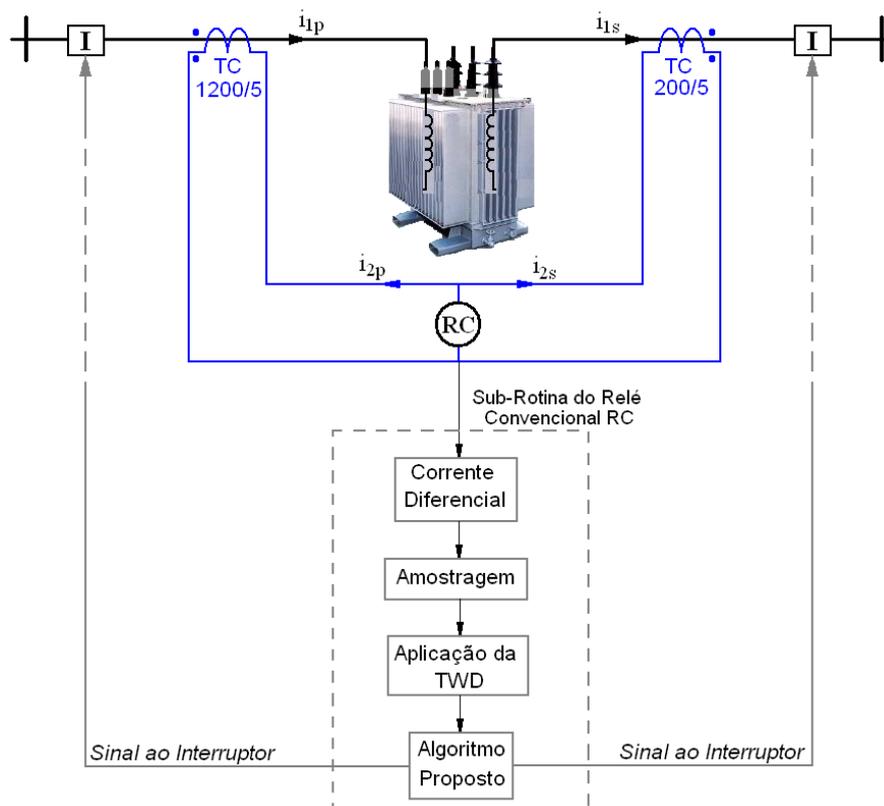


Figura 5.2: Esquema simplificado da metodologia de proteção proposta.

Os sinais de entrada do algoritmo proposto são as correntes diferenciais amostradas a uma frequência de 30 kHz. Após disso a corrente diferencial de cada fase é calculada segundo a equação (5.9). Sendo essa superior a um valor de ativação pré-definido, é aplicada a transformada wavelet discreta sob as correntes diferenciais para decompondo-as num conjunto de sinais, cada um delas correspondendo a uma largura de faixa diferente, logo, uma análise dessas componentes é realizada pelo algoritmo proposto. A seguir, apresentam-se detalhes do algoritmo de proteção desenvolvido neste trabalho.

### 5.3.1 Fundamentação Teórica da Metodologia Proposta

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 et al., 2008). Neste trabalho, o critério proposto para discriminar a *existência* ou *não-existência* de uma condição de falta interna, externa ou corrente de *inrush* no transformador é baseado em um índice que quantifica as características do 1º detalhe da decomposição wavelet das correntes diferenciais do transformador. O primeiro detalhe da transformada wavelet foi escolhido pelo fato das faltas internas estarem caracterizadas nesta faixa de frequência, em quanto faltas externas e correntes *inrush* são caracterizadas por sinais transitórios em outras faixas de frequências, a saber, 0.1 – 1 kHz (SWIFT, 1979). O valor atingido pelo índice de discriminação relaciona-se com a mudança de energia espectral dos coeficientes do 1º detalhe da TWD.

A variação de energia espectral dos coeficientes de detalhe wavelet foi utilizada como critério de discriminação entre os diferentes tipos de distúrbios simulados. A energia dos coeficientes de detalhe, chamada como energia de espectro de detalhe

(*detail spectrum energy – DSE*) é calculada através da seguinte expressão (COSTA, et al., 2007):

$$\varepsilon_{\omega}(k) = \sum_{n=k}^{k+N_{\omega}/2^j} d_j^2(n) \quad (5.8)$$

onde:

$$k = \{1, 2, \dots, (N_s - N_w) / 2^j\},$$

$N_w$  : número de amostras contidas em um ciclo do sinal original na frequência fundamental;

$N_s$  : número total de amostras contidas no sinal original;

$j$  : fator de escala.

### 5.3.2 Metodologia de Detecção e Discriminação dos Distúrbios

No intuito de facilitar a construção prática do algoritmo de proteção proposto, a metodologia foi projetada como uma sub-rotina de um programa principal de um relé digital convencional. A arquitetura lógica desse algoritmo está composta por duas sub-rotinas operacionais (blocos), ditas: *Detecção do Distúrbio* (BLOCO 1) e *Discriminação do Distúrbio* (BLOCO 2).

O fluxograma do algoritmo de proteção proposto é apresentado na Figura 5.3, onde se ilustra o esquema de decisão lógica do algoritmo. Nesse, as correntes trifásicas diferenciais são obtidas através dos secundários dos TCs conectados nos enrolamentos primários e secundários do transformador de potência a ser protegido. O funcionamento detalhado desse esquema de proteção descreve-se a seguir.

#### A BLOCO 1: Detecção do Distúrbio

**Passo (a):** A primeira operação feita pelo algoritmo de proteção é o cálculo das correntes trifásicas diferenciais, as quais servirão como sinais de análise. Essas correntes são obtidas através de TCs ligados nos enrolamentos primários e secundários do transformador de potência. A relação de transformação dos TCs primários é 1200/5 e a dos TCs secundários 200/5. Neste trabalho, as correntes trifásicas diferenciais são amostradas a uma frequência de 30 kHz e calculam-se através das equações seguintes:

$$\begin{aligned} Id_A &= (I_{1A} - I_{2A}) \\ Id_B &= (I_{1B} - I_{2B}) \\ Id_C &= (I_{1C} - I_{2C}) \end{aligned} \quad (5.9)$$

onde tem-se que:

$I_{1A}, I_{2A}$ : correntes primárias e secundárias do transformador de potência na fase A, respectivamente.

$I_{1B}, I_{2B}$ : correntes primárias e secundárias do transformador de potência na fase B, respectivamente.

$I_{1C}, I_{2C}$ : correntes primárias e secundárias do transformador de potência na fase C, respectivamente.

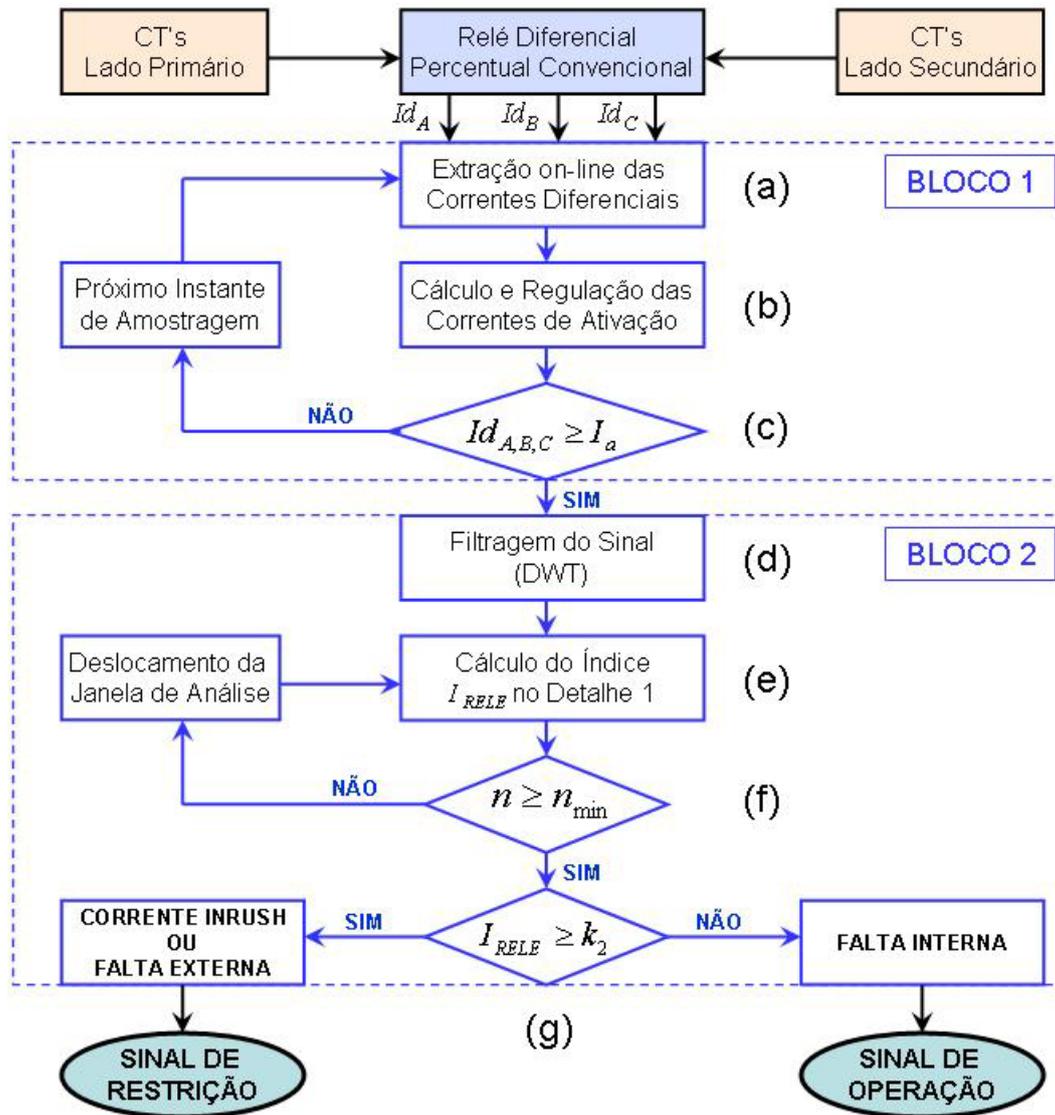


Figura 5.3: Fluxograma do algoritmo de proteção proposto.

**Passo (b):** O algoritmo de proteção proposto é ativado quando qualquer uma das correntes diferenciais ( $I_{dA}$ ,  $I_{dB}$ ,  $I_{dC}$ ) ultrapassa o valor de ativação pré-definido nessa etapa. A ativação do algoritmo é feita através de um *limiar* de corrente, calculada como a corrente de restrição do relé diferencial convencional (HOROWITZ e PHADKE, 1995), ou seja, como a média das correntes secundárias dos TCs. Esse cálculo é feito para cada uma das fases (A, B e C), e as equações (5.10) a seguir ilustram a forma de cálculo da corrente de ativação do algoritmo:

$$\begin{aligned}
 I_a^A &= k \cdot i_m = k \cdot \frac{(i_{2p} + i_{2s})^A}{2} \\
 I_a^B &= k \cdot i_m = k \cdot \frac{(i_{2p} + i_{2s})^B}{2} \\
 I_a^C &= k \cdot i_m = k \cdot \frac{(i_{2p} + i_{2s})^C}{2}
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

onde:

- $I_a$  - corrente de ativação do algoritmo para as fases A, B e C;
- $k$  - característica diferencial percentual (fator de regulação);
- $i_m$  - corrente média de restrição;
- $i_{2p}, i_{2s}$  - correntes secundárias dos TCs para as fases A, B e C.

Cabe salientar que, nessa equação, os parâmetros  $i_{2p}$  e  $i_{2s}$  são as correntes secundárias dos TCs (denotado pelo sub-índice 2) ligados no enrolamento primário e secundário do transformador trifásico sob proteção (denotado pelos sub-índices  $p$  e  $s$ ). A regulação dessa corrente é feita através de um índice  $k$ , utilizado para prevenir falsas operações devido à saturação dos TCs ou mudanças bruscas de *tap* no transformador de potência. O valor de  $k$  é conhecido como *característica diferencial percentual* e define a região de ativação do algoritmo proposto. Essa região de ativação foi mostrada anteriormente na Figura 2.3 e é expressa como um valor percentual cujos valores característicos são 10%, 20% e 40%. É importante que um relé com uma constante de ativação igual a 10% será muito mais sensível que um relé com uma constante igual a 40% (HOROWITZ e PHADKE, 1995).

**Passo (c):** Nesta etapa, o algoritmo de proteção compara a amplitude entre a corrente diferencial e a de ativação, como fica expresso pela equação (5.11). Essa comparação é feita para todas as fases analisadas (A, B e C).

Quando uma destas correntes diferenciais ultrapassa o valor de ativação  $I_a$  o BLOCO 2 do algoritmo ativa-se e começa a analisar o sinal diferencial com a técnica Wavelet. Se nenhuma destas correntes 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 fica dada pela seguinte equação:

$$\left| I_{d_{A,B,C}} \right| \geq \left| I_a^{A,B,C} \right| = \left| k \cdot i_m \right| = \left| k \cdot \frac{(i_{2p} + i_{2s})^{A,B,C}}{2} \right| \quad (5.11)$$

Quando o valor de ativação  $I_a$  for superado por qualquer uma das corrente correntes diferenciais, o algoritmo detecta o distúrbio e o bloco 2 inicia-se. Neste, a discriminação entre falta externa, falta interna ou corrente *inrush* é feita.

## B BLOCO 2: Discriminação do Distúrbio

**Passo (d):** Quando a condição expressa pela equação (5.11) é atingida por qualquer uma das correntes trifásicas diferenciais, o algoritmo inicia o BLOCO 2 do esquema de decisão lógica. As correntes diferenciais são os sinais de entrada desse bloco, e são processadas inicialmente pela Transformada Wavelet Discreta (TWD). Um banco de filtros passa-baixos e passa-altos, configurados em uma estrutura piramidal como a mostrada na Figura 5.1, decompõe o sinal original de corrente diferencial. Esse sinal é decomposto em um conjunto de sinais distribuídos em várias faixas de frequências e apresentadas através das saídas do banco de filtros (aproximações e detalhes).

**Passo (e):** Depois do sinal de corrente diferencial ser decomposto através do banco de filtros, o algoritmo analisa a variação da energia dos coeficientes wavelet no primeiro detalhe da decomposição. A decisão de discriminar entre falta interna, externa e

corrente *inrush* é tomada com base no índice calculado através da equação (5.12), quantificado-o em uma janela de dados de análise pré-determinada. Esse índice, chamado  $I_{RELÉ}$ , é definido como a relação entre o máximo coeficiente do 1º detalhe da decomposição wavelet ( $I_{max,D1}$ ) e a energia espectral dos outros coeficientes presentes no mesmo detalhe e na mesma janela. A energia espectral das componentes do 1º detalhe é calculada como mostra a equação (5.8) e considerando em  $\Delta t$  igual a 1/4 de ciclo.

$$I_{RELÉ} = \frac{I_{max,D1}}{\sum_{n=1}^N |d_{(n)}|^2 \Delta t} \quad (5.12)$$

onde:

- $I_{max,D1}$  - máximo coeficiente do detalhe 1 da TWD;
- $d_{(n)}$  - n-ésima componente do detalhe 1 da TWD da corrente diferencial;
- $N$  - número total de coeficiente no detalhe 1;
- $\Delta t$  - período de amostragem;

Após o cálculo da energia espectral das componentes do 1º detalhe, esse índice é utilizado para discriminar os distúrbios. Em condições normais de funcionamento ou quando da energização do transformador de potência, a variação de energia espectral observada nos coeficientes do referido detalhe wavelet é muito baixa. O mesmo acontece quando ocorre uma falta externa ao transformador, por exemplo, na linha de transmissão. Quando uma falta interna ocorre no transformador, uma mudança abrupta na energia espectral, em função do tempo é observada, sendo que a mesma aumenta consideravelmente. Esse comportamento faz com que o índice  $I_{RELÉ}$  tenha valores distintos perante diferentes distúrbios (falta externa, falta interna e corrente *inrush*). Por exemplo, quando uma falta interna é detectada no transformador de potência a energia espectral dos coeficientes de detalhe atinge valores elevados, reduzindo o valor do índice  $I_{RELÉ}$ . Já em presença de faltas externas ou correntes de magnetização *inrush*, a energia espectral é muito menor que a energia espectral gerada por uma falta interna e, como consequência, o valor do índice  $I_{RELÉ}$  aumenta. Baseado nessa variação de energia espectral o algoritmo proposto identifica uma falta externa ou corrente *inrush*, quando o índice  $I_{RELÉ}$  ultrapassa um *limiar* ( $k_2$ ) pré-definido.

A metodologia proposta realiza a comparação do índice  $I_{RELÉ}$  com o valor *limiar* ( $k_2$ ) após um número mínimo de janelas de dados consecutivas. Isso se torna necessário porque as simulações realizadas demonstraram que a ocorrência conjunta de distúrbios (por exemplo, falta interna e energização do transformador acontecendo no mesmo instante) poderia provocar uma incorreta discriminação por parte do algoritmo. Sendo assim, neste trabalho foi adotado um número mínimo de três (3) janelas consecutivas para o cálculo do índice  $I_{RELÉ}$ . Deve ser destacado que o índice  $I_{RELÉ}$  é calculado em uma janela de comprimento pré-definido, que neste trabalho foi considerado de 1/4 ciclo (4,16 ms em 60 Hz).

**Passo (f):** O número mínimo de janelas de análise para o cálculo do índice  $I_{RELÉ}$  pode ser escolhido pelo técnico ou engenheiro de proteção em função do desempenho do algoritmo em diferentes configurações de Sistemas Elétricos. Em alguns casos simulados, a utilização de duas janelas de cálculo foi suficiente para discriminar corretamente o distúrbio. Na Figura 5.4, é apresentado em forma gráfica o procedimento de cálculo do índice  $I_{RELÉ}$ .

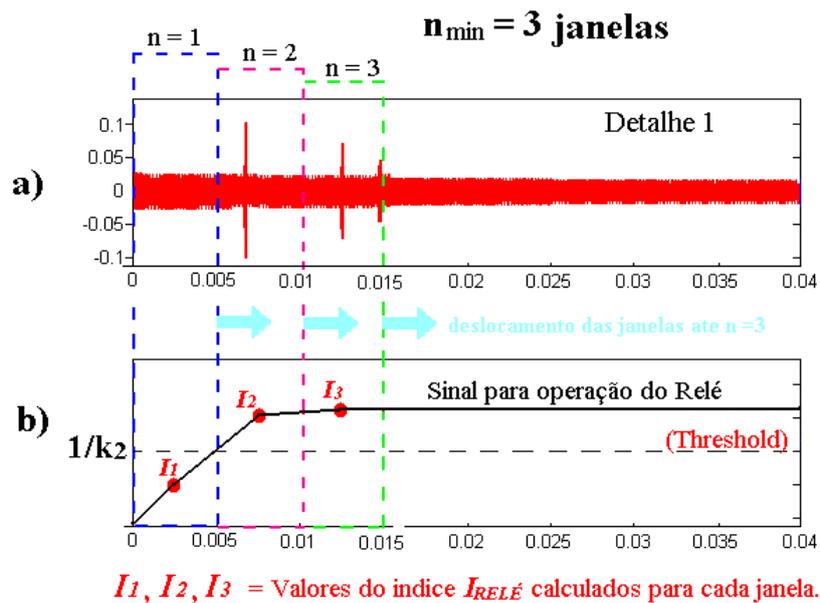


Figura 5.4: Exemplificação gráfica do cálculo do índice  $I_{RELÉ}$  em cada janela.

A Figura 5.4 ilustra um caso onde se verifica que a quantidade da janela de cálculo utilizada na análise do distúrbio, atingiu o número mínimo pré-definido. A janela de cálculo é deslocada  $1/4$  de ciclo cada vez que o número de janelas não atinge o número mínimo ( $n > n_{min} = 3$ ) e um novo índice  $I_{RELÉ}$  é logo calculado. No final desse processo três valores de  $I_{RELÉ}$  serão calculados, como mostra a Figura 5.4.b.

**Passo (g):** Após a verificação do número de janelas de cálculo, o algoritmo compara os valores dos índices  $I_{RELÉ}$  calculados na etapa anterior com um *limiar* pré-definido, dito  $k_2$ . Um exemplo gráfico dessa comparação é ilustrado na Figura 5.4.b. Nesse sentido, se pelo menos dois dos três valores de  $I_{RELÉ}$  calculados forem maiores a  $k_2$ , a decisão lógica do algoritmo será que o relé de proteção não atue, já que o distúrbio será identificado como uma falta externa ou uma corrente de *inrush*. No entanto, se pelo menos dois dos três índices  $I_{RELÉ}$  calculados resultarem menores que  $k_2$ , o algoritmo identificará o distúrbio como sendo uma falta interna. Neste trabalho, o valor  $k_2$  adotado foi de 0.3, e foi definido após várias simulações computacionais onde se testou o algoritmo de proteção desenvolvido.

## 5.4 Construção Numérica do Algoritmo

### 5.4.1 Software para Simulação dos Distúrbios

Neste trabalho, as simulações numéricas desenvolvidas sob o Sistema Elétrico em estudo foram realizada utilizando o *software* ATP/EMTP (*Alternative Transient Program/ElectroMagnetic Transient Program*) (Bonneville Power Administration, 2007). Esse programa computacional foi escolhido com base na facilidade, aplicabilidade, exatidão e capacidade desse programa quando da simulação de fenômenos transitórios eletromagnéticos que ocorrem no transformador e nos sistemas elétricos de potência.

### 5.4.2 Descrição da Arquitetura da Interface Gráfica

Para facilitar a análise dos casos estudados neste trabalho, a metodologia de proteção proposta foi implementada através de uma interface gráfica em ambiente MatLab® (Mathworks MatLab, 2007) o que facilitou a análise dos distúrbios simulados. A Figura 5.5 ilustra a arquitetura completa da interface gráfica através da qual se pode selecionar o tipo de distúrbio a simular, bem como escolher as características da análise Wavelet e, finalmente, visualizar o diagnóstico final do algoritmo de proteção. Ela foi projetada em três blocos funcionais, onde cada bloco permite ao usuário escolher tanto as características desejadas para o processo de simulação do distúrbio quanto as características da análise Wavelet.

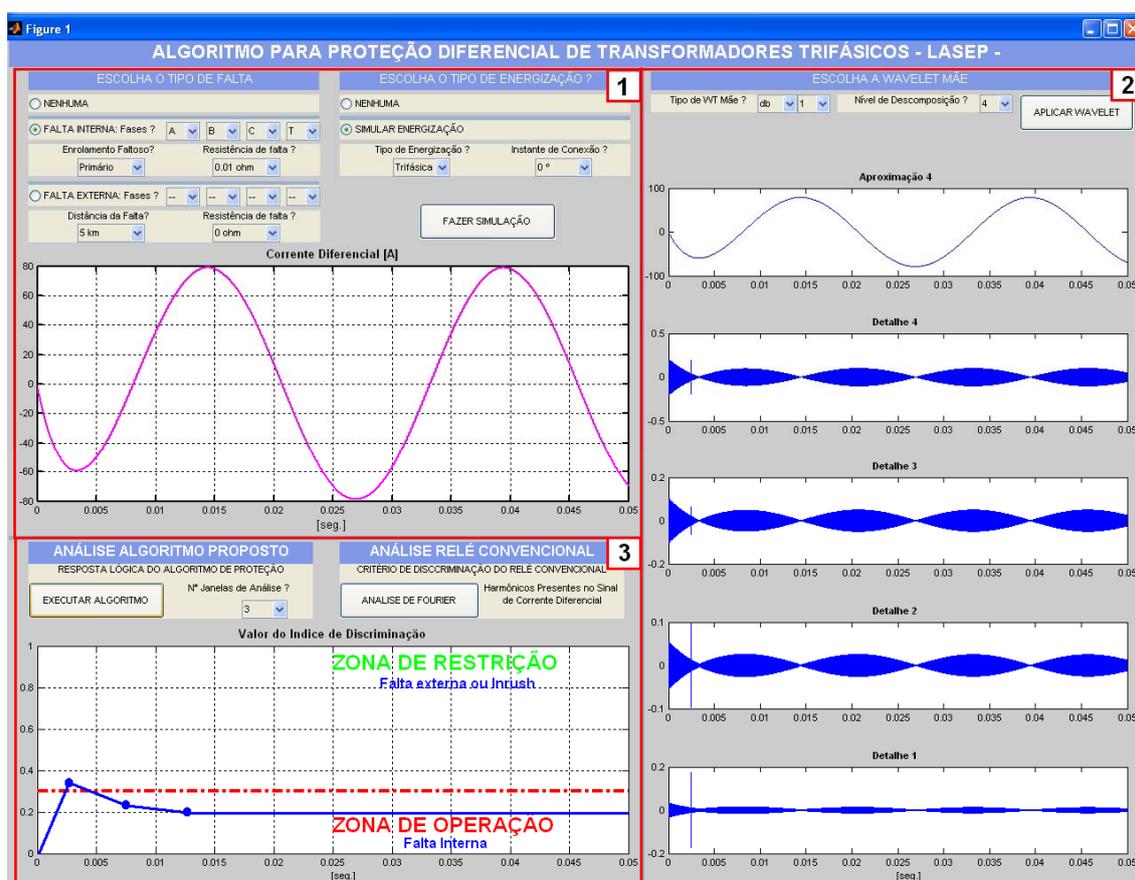


Figura 5.5: Principais grupos de dados da interface gráfica do algoritmo.

Como ilustra a Figura 5.5, a arquitetura da interface gráfica pode ser dividida em três blocos funcionais, a saber:

- 1) Seleção do tipo de distúrbio;
- 2) Seleção das características da análise Wavelet;
- 3) Visualização da análise feita pelo algoritmo de proteção.

Conforme apresentado anteriormente, os sinais de corrente trifásica diferencial utilizada pelo algoritmo de proteção são obtidos através da simulação computacional de diferentes distúrbios sob um sistema elétrico modelado no software ATP/EMTP. Os dados que são utilizados pela interface gráfica são previamente simulados, ou seja, não pode ser introduzido um valor que não esteja entre as opções oferecidas pelo programa. A interface gráfica possibilita apenas uma opção de configuração do sistema elétrico e de conexões do transformador de potência.

Na Figura 5.6 remarcam-se com círculos os dados de simulação a serem preenchidos pelo usuário no momento da análise dos eventos estudados neste trabalho. Esses quadros de dados serão explicados a seguir.

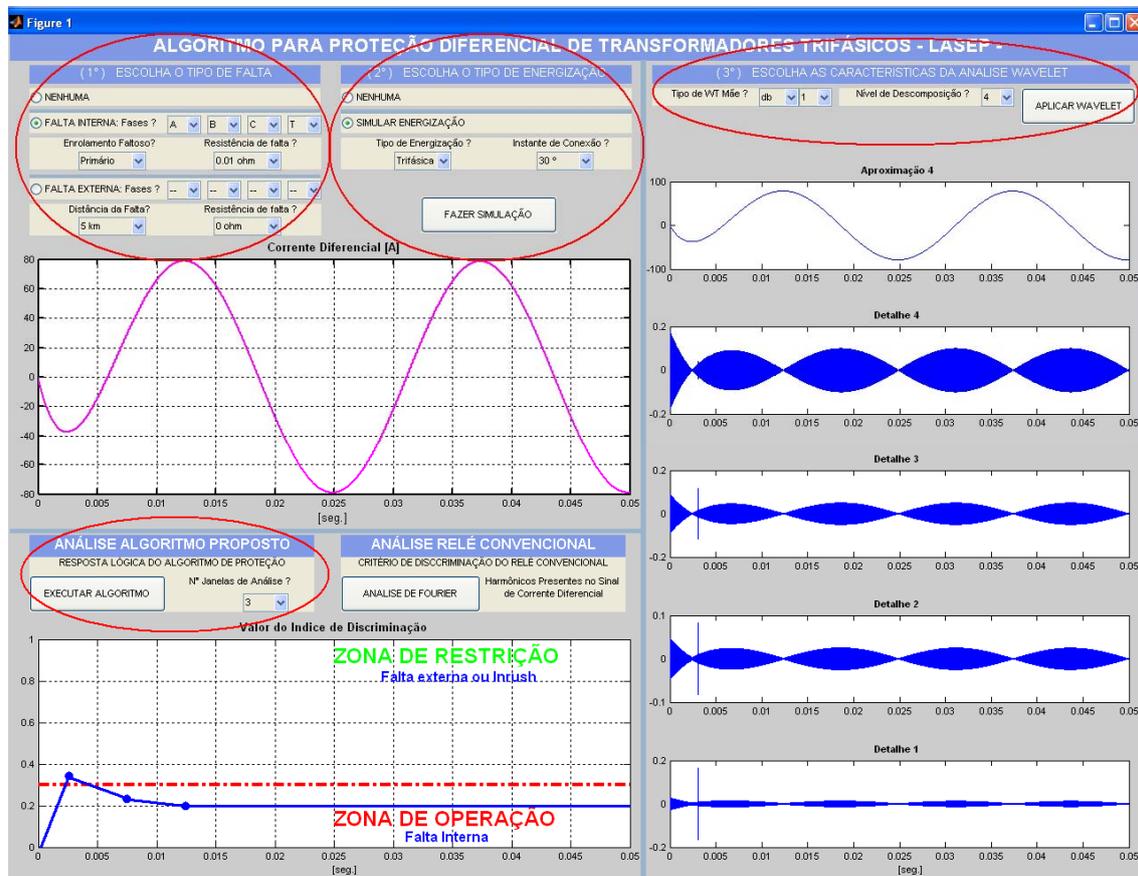


Figura 5.6: Blocos de dados necessários para a simulação e análise dos distúrbios.

## 1 Seleção do Tipo de Distúrbio

Inicialmente, deve-se escolher o tipo de distúrbio que será simulado e analisado pelo algoritmo de proteção. Existe a possibilidade de fazer a simulação individual dos seguintes fenômenos: energização do transformador de potência, falta interna e falta externa ao transformador. Além disso, também é possível simular uma combinação de vários distúrbios acontecendo no mesmo instante.

A figura 5.7 ilustra o primeiro bloco de dados a ser preenchido pelo usuário. Nesse, é possível escolher, através do quadro 1º, as características para a simulação de um caso de falta interna ou externa ao transformador. No quadro 2º o usuário escolhe as características correspondentes a um caso de energização do transformador.

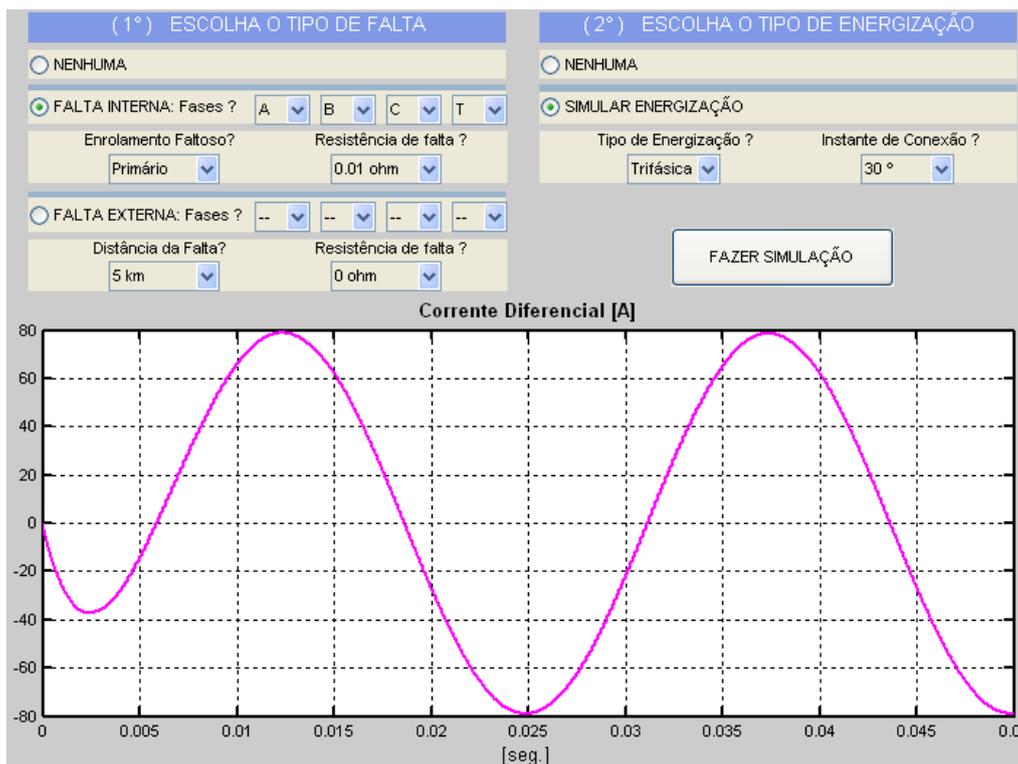


Figura 5.7: Bloco 1° e 2° utilizado para a seleção do tipo de falta a simular pelo *software* ATP/EMTP.

Na simulação de uma FALTA INTERNA, são especificadas as fases envolvidas na falta (Fases A, B, C) podendo-se simular uma falta entre qualquer uma das fases e Terra (T). A seleção do enrolamento faltoso entre “*Primário e Secundário*” é necessária junto com a escolha do valor de resistência de falta entre 0  $\Omega$ , 0.01  $\Omega$ , 1  $\Omega$ , 10  $\Omega$  e 100  $\Omega$ . Para simular uma FALTA EXTERNA, além de selecionar as fases envolvidas na falta, pode-se escolher o local da falta, ou seja, a distância sobre a linha de transmissão (medida desde o transformador de potência) onde a falta externa irá acontecer. Também nesse caso um valor de resistência de falta pode ser escolhido entre os valores citados acima.

Na simulação de ENERGIZAÇÃO do transformador, uma escolha entre energização “*Trifásica, Bifásica e Monofásica*” é possível junto à seleção do instante de fechamento do interruptor entre: 0°; 30°; 60° e 90°. O instante de fechamento fica representado através do ângulo que o vetor de tensão adota em relação ao eixo de referência.

## 2 Seleção das Características da Análise Wavelet

Após a escolha do distúrbio a ser simulado, deve ser feita a seleção do tipo de Wavelet a ser utilizada na análise. Uma escolha adequada do tipo de função wavelet (wavelet mãe) e do nível de decomposição ajudará a melhorar a eficiência do algoritmo de proteção proposto. A Figura 5.8 ilustra o quadro de dados a serem escolhidos para a aplicação da TWD.

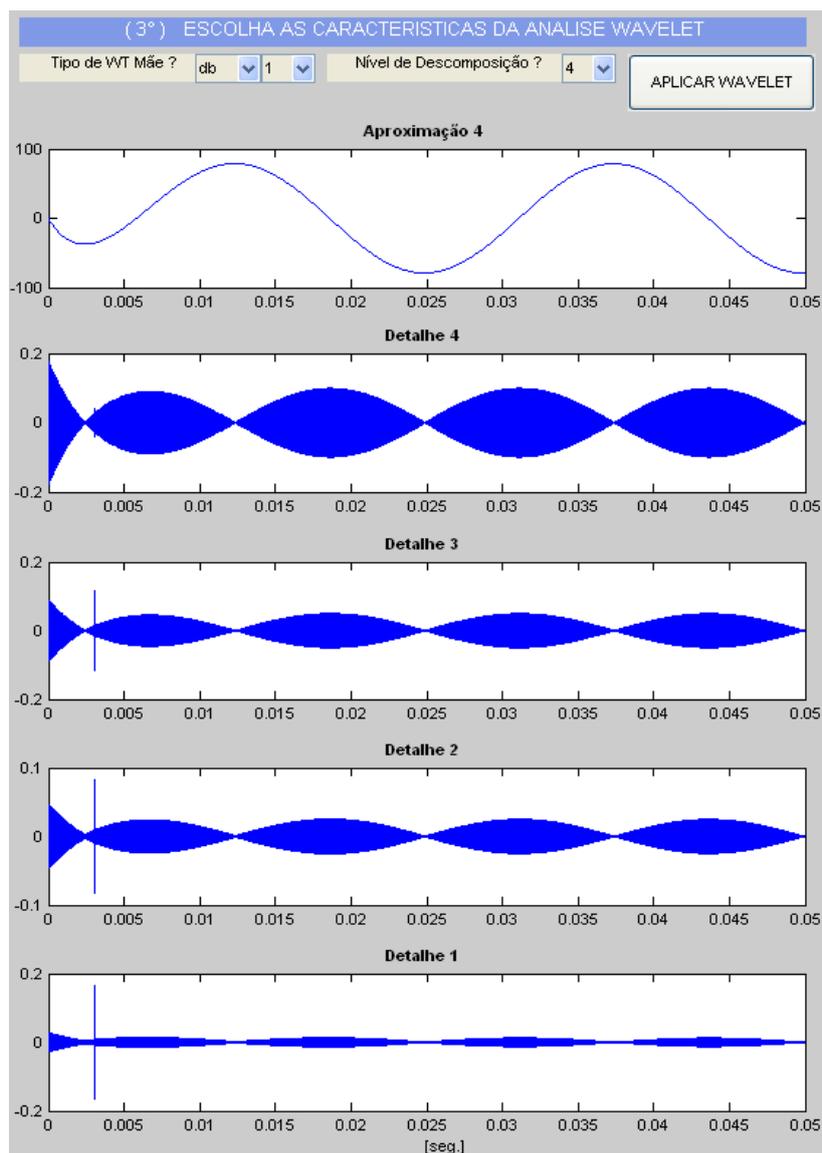


Figura 5.8: Bloco 3º para seleção das características da análise wavelet.

Nesse bloco, deve-se selecionar qual será o wavelet mãe utilizada na decomposição do sinal de corrente diferencial. Entre as opções, se tem *Daubechies*, *Haar* e *Symlet*. Essa variação da função wavelet permitira fazer uma análise do desempenho que cada tipo de família wavelet apresenta no funcionamento do algoritmo de proteção. Nesse bloco também se escolhe o nível de decomposição desejado para o sinal de análise, sendo esse nível dependente da frequência de amostragem utilizada.

### 3 Visualização da análise feita pelo algoritmo de proteção

Este bloco tem a finalidade de executar o algoritmo de proteção proposto e apresentar os resultados da análise. O número mínimo de janelas de análise deve ser escolhido antes de executar o algoritmo de discriminação. A escolha entre 1, 2 ou 3 janelas para o cálculo do índice  $I_{RELÉ}$  é possível neste bloco. A Figura 5.9 ilustra a opção de comparação da metodologia proposta com a análise tradicional de Fourier. Essa opção pode ser executada através do botão “ANÁLISE DE FOURIER”, que mostram quais são os componentes harmônicos presentes no sinal diferencial. Isso permite comparar a

amplitude da segunda harmônica com a amplitude da fundamental e discriminar o distúrbio segundo a metodologia convencional de restrição de harmônicas.

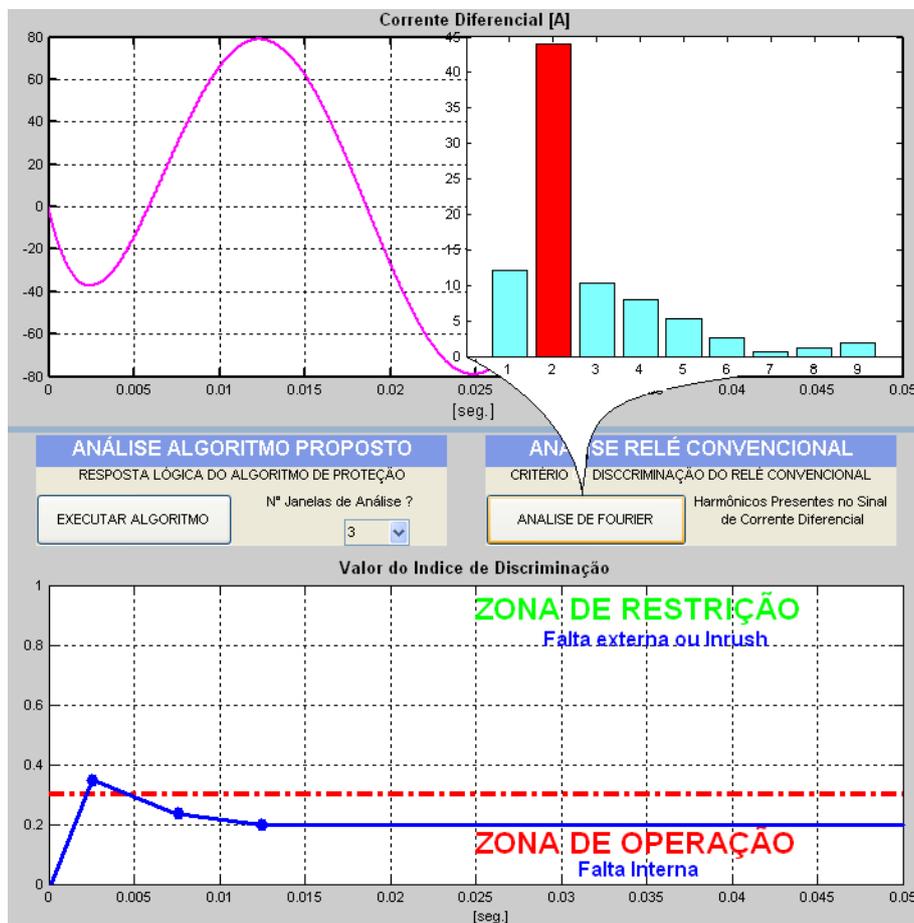


Figura 5.9: Bloco 4º de execução do algoritmo e visualização de resultados.

## 5.5 Resumo

As características que a Transformada Wavelet apresenta a tornam uma poderosa ferramenta de análise para fenômenos transitórios em Sistemas Elétricos de Potência. A sua construção computacional através de um banco de filtros digitais foi aplicada e utilizada no desenvolvimento da metodologia de proteção proposta.

A variação de energia espectral que enxergada nos coeficientes de detalhe da TWD perante um distúrbio elétrico transitório, é utilizada nesse algoritmo como fator de discriminação entre faltas internas, faltas externas e correntes de magnetização *inrush*. Essa variação de energia torna-se maior quando uma falta interna ao transformador ocorre e o 1º detalhe da decomposição wavelet serve como dado de análise e de cálculo dessa energia.

O projeto e utilização de uma interface gráfica desenvolvida em ambiente MatLab® permite a simulação e análise de vários casos de faltas externas, internas e energização de um transformador trifásico. O programa desenvolvido permite ainda a simulação de diferentes condições operacionais do sistema elétrico teste, e utiliza dados gerados pelo *software* ATP/EMTP. Finalmente, a construção gráfica computacional permite uma apresentação dos resultados obtidos pela metodologia de proteção proposta.

## 6 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

### 6.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em um estudo de caso onde utilizou-se o algoritmo de proteção diferencial desenvolvido neste trabalho.

Na seção 6.2 apresentam-se os dados elétricos dos equipamentos que constituem o Sistema Elétrico de Potência estudado, bem como as considerações sobre os modelos elétricos utilizados no estudo.

A apresentação dos casos estudados e analisados é discutida na Seção 6.3.

A seção 6.4 apresenta uma análise do desempenho do algoritmo proposto frente às diferentes condições de operação. Nessa seção é apresentado ainda, um estudo comparativo do desempenho da metodologia proposta quando comparada a técnica clássica de proteção diferencial baseada na análise de Fourier (HOROWITZ et al., 1995). Uma análise do desempenho da técnica proposta frente à utilização de diferentes wavelets mãe é também apresentada.

### 6.2 Sistema Elétrico Estudado

O Sistema Elétrico de Potência estudado foi simulado através do *software* ATP/EMTP (Bonneville Power Administration, 2007). Os estudos realizados compreenderam a simulação numérica de diversos casos de interesse: faltas internas, externas e energização do transformador.

A Figura 6.1 ilustra o Sistema Elétrico de Potência utilizado na simulação dos casos estudados.

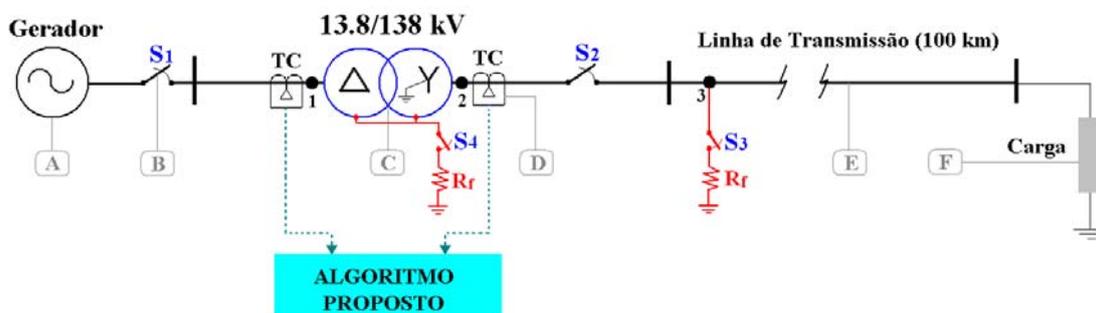


Figura 6.1: Esquema representativo do sistema elétrico utilizado no ATP/EMTP.

O sistema elétrico é composto por uma fonte de geração (gerador) das seguintes características, tensão nominal: 13.8 kV, frequência: 60 Hz e potência: 30 MVA.

Essa fonte de geração fornece a tensão primária a um transformador trifásico ( $T_{3\phi}$ ) de 35 MVA cuja relação de transformação é 13.8/138 kV e cujos enrolamentos estão conectados em uma configuração triângulo-estrela aterrado. Dois transformadores de corrente (TCs) foram conectados nos enrolamentos primários e secundários do  $T_{3\phi}$ . As relações de transformação dos TCs conectados no primário e secundário do TP são 1200/5 e 200/5 respectivamente. O transformador de potência fornece energia a uma carga indutiva trifásica com fator de potência de 0.92 através de uma linha de transmissão de 138 kV e de 100 km de comprimento.

Os disjuntores apresentados na Figura 6.1,  $S_1$  e  $S_2$ , são utilizados para simular a manobra de energização do  $T_{3\phi}$ . Nesse fenômeno estudado, o transformador é conectado a vazio, sem carga (disjuntor  $S_2$  em aberto) e o circuito elétrico corresponde ao enrolamento primário e à característica de saturação do transformador de potência. A chave  $S_3$  é fechada através de uma resistência de falta  $R_f$  quando da simulação de uma falta externa na linha de transmissão. Já o fechamento da chave  $S_4$  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  $R_f$ .

### 6.2.1 Elementos do Sistema Elétrico

A modelagem mais adequada para a realização de um estudo de fenômenos transitórios está associada ao tipo de fenômeno que está sendo pesquisado e a ferramenta computacional disponível. Os equipamentos utilizados no modelo do Sistema Elétrico representado na Figura 6.1 foram modelados segundo (PEREIRA & AMON FILHO, 1996) e são detalhados a seguir:

#### A Gerador de Energia: (Fonte de Tensão Constante)

O modelo da fonte de tensão constante tem a vantagem de ser muito simples e de apresentar um comportamento satisfatório quando da simplificação na representação da rede elétrica modelada. A tensão e a frequência da fonte equivalente de tensão permanecem fixas, ou seja, não há variações nos valores durante o período da simulação. A Figura 6.2 ilustra o modelo de uma fonte de tensão constante junto aos parâmetros utilizados neste trabalho.

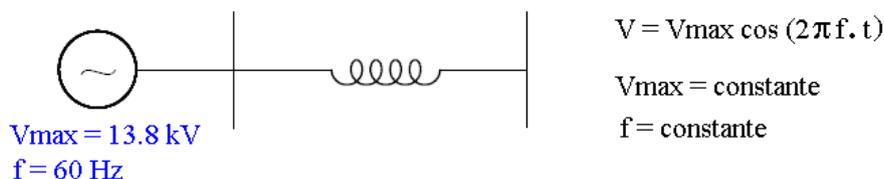


Figura 6.2: Modelo de fonte de tensão constante utilizado no circuito da Figura 6.1.

#### B Disjuntores: (Chaves)

Os disjuntores  $S_1$  e  $S_2$  foram modelados por chaves estatísticas para incluir a aleatoriedade dos instantes de fechamento dos contatos. A eliminação de faltas externas através do disjuntor  $S_2$  deve ser aplicada por chaves sistemáticas para permitir uma varredura na onda de tensão (o instante de ocorrência do curto-circuito deve variar em função do ângulo de fase da tensão). Já os disjuntores  $S_3$  e  $S_4$  foram representados pelo modelo de chaves tempo-controladas, ou seja, escolhe-se somente o instante de tempo no qual a chave fecha ou abre.

### C Transformador de Potência: ( $T_{3\phi}$ )

Os transformadores devem ser modelados com a sua característica de saturação, a qual tem influência nas sobre-tensões resultantes. 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. Dentre os modelos apresentados no capítulo 4, este corresponde ao modelo STC disponível no *software* ATP/EMTP. O conhecimento da característica da curva de saturação do transformador de potência é de grande importância em estudos que envolvem fenômenos de energização, dada a relevância do fluxo residual nas correntes *inrush*. A Figura 6.3 ilustra a curva de saturação do transformador de potência utilizado neste trabalho.

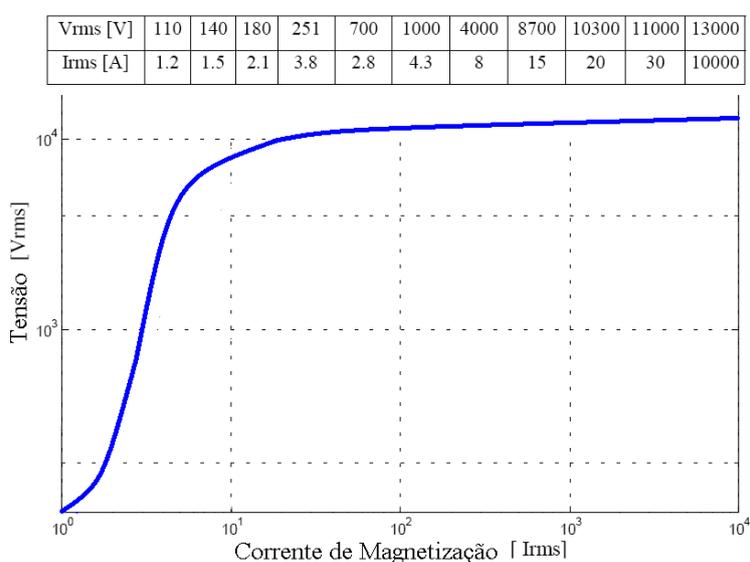


Figura 6.3: Curva de saturação do transformador de potência de 35 MVA.

Os parâmetros utilizados para a modelagem do transformador de potência são detalhados na tabela 6.1 a seguir:

Tabela 6.1: Parâmetros utilizados na modelagem do transformador de potência.

PARÂMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADE
Potência Aparente	S	35	MVA
Tensão Primária	$U_1$	13.8	kV
Tensão Secundária	$U_2$	138	kV
Resistência de magnetização	$R_{mag}$	5,4	Ohms
Resistência Primário	$R_1$	0.2	Ohms
Indutância Primário	$L_1$	0.23	mH
Resistência Secundário	$R_2$	0.7	Ohms
Indutância Secundário	$L_2$	0.7	mH

A Figura 6.4 apresenta o modelo monofásico do transformador utilizado neste estudo. Nessa figura, são ilustradas as impedâncias de dispersão de cada enrolamento, o ramo magnetizante com saturação e perdas no núcleo e a relação de transformação entre os enrolamentos.

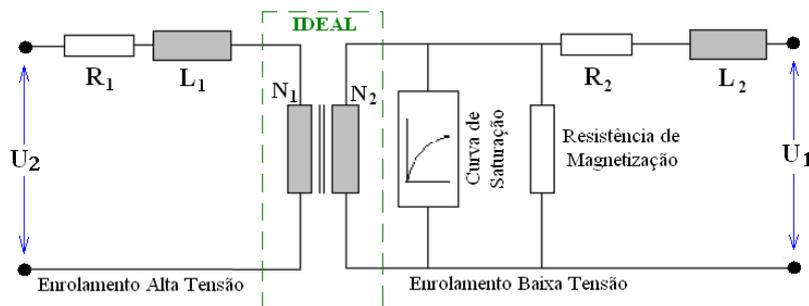


Figura 6.4: Modelo STC (Transformador Monofásico Saturável) do ATP/EMTP.

Para a adaptação desse modelo monofásico ao sistema elétrico trifásico da Figura 6.1 e às situações a serem simuladas pelo *software* ATP/EMTP, modelou-se uma configuração trifásica (13.8 kV para 138 kV) composta por três transformadores monofásicos de iguais características. Esse banco de transformadores foi conectado como uma conexão delta-estrela aterrada, tal como ilustra a Figura 6.5.

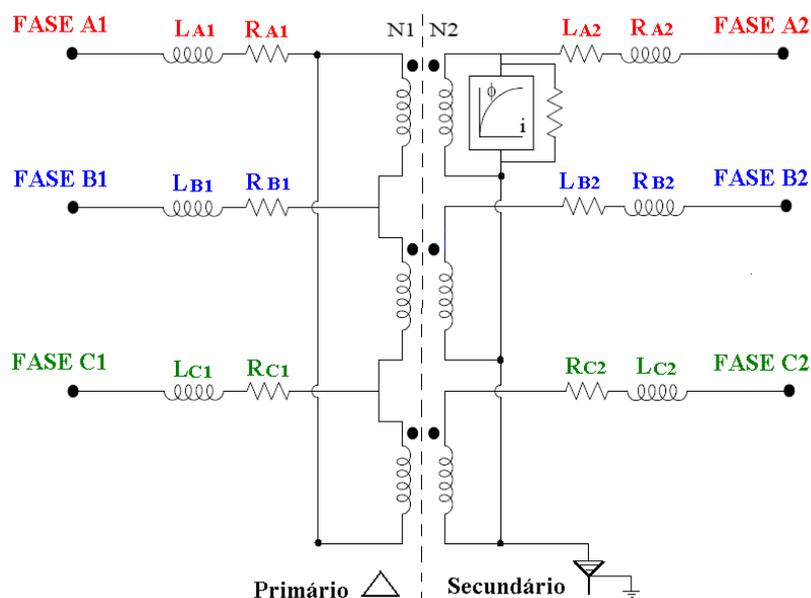


Figura 6.5: Detalhe das conexões dos enrolamentos monofásicos.

#### D Transformador de Corrente: (TCs)

Na conexão dos TCs junto ao transformador de potência, é importante adotar algumas recomendações práticas utilizadas nos esquemas de proteção diferencial de campo. Qualquer sistema elétrico constituído de um transformador de potência ligado em conexões do tipo estrela-triângulo ou triângulo-estrela apresenta uma defasagem angular de 30 graus entre as correntes dos lados primários e secundários do transformador (MONSEF et al., 2007). Essa defasagem entre as correntes pode provocar correntes diferenciais importantes nos secundários dos TCs e, para corrigir esse problema de defasagem angular, é usado na prática um artifício que consiste em instalar os equipamentos de medição (TCs) de maneira inversa às ligações do transformador principal. Dessa forma, para um transformador ligado em estrela-triângulo, por exemplo, usam-se os TCs conectados em triângulo-estrela, e vice-versa (CAMINHA, 1997).

As características utilizadas para a modelagem dos TCs foram obtidas segundo (FOLKERS, 1999) quem recomenda para a modelagem dos TCs a utilização do modelo clássico do Transformador Saturável disponível no ATP/EMTP, ilustrado na Figura 6.4, mas considerando os seguintes fatores importantes:

1. No modelo de Transformador Saturável (modelo STC do ATP/EMTP) o enrolamento secundário utiliza-se como sendo o enrolamento primário para a modelagem dos TCs.
2. No enrolamento secundário ajusta-se o valor de resistência em  $R_2 = 0 \Omega$  e a indutância  $L_2$  deve ser distinta de zero para as simulações feitas neste trabalho, 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  $L_1$  ajusta-se a zero, já que na prática a indutância do primário dos TCs é desprezível.
4. A resistência do enrolamento primário  $R_1$  ajusta-se ao valor da resistência do enrolamento secundário dos TCs.
5. A resistência de magnetização  $R_{mag}$  pode ajustar-se a infinito, considerando que na prática ela é muito grande. No software ATP esse ajuste é feito colocando um valor zero no quadro correspondente ao valor de  $R_{mag}$ .

Os TCs foram calculados em função das correntes nominais do transformador de potência e as curvas de saturação escolhidas segundo (IEEE Std C57.13-1993). utilizados apresentam relações de transformação de 1200/5 e 200/5 nos enrolamentos primários e secundários respectivamente. A Figura 6.6 ilustra a curva de saturação dos TCs conectados no primário do transformador de potência.

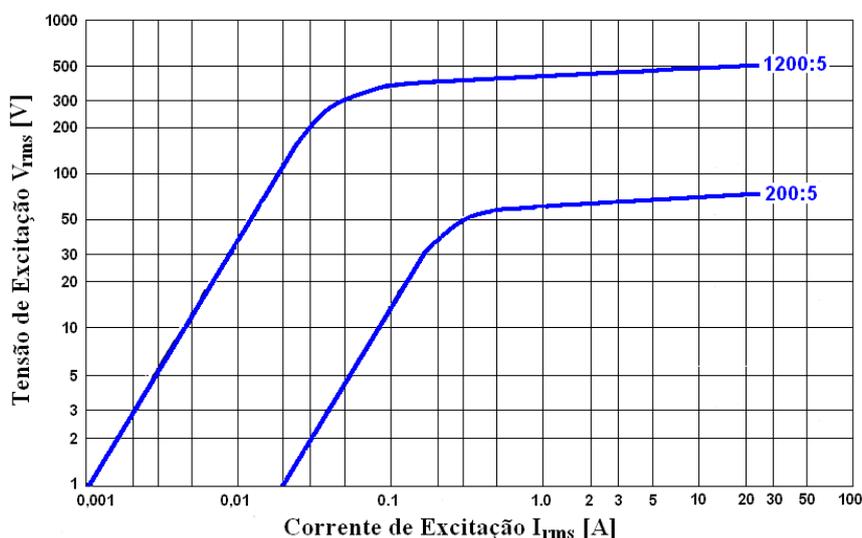


Figura 6.6: Curva de saturação dos transformadores de corrente 1200:5 e 200:5.

## E Linha de Transmissão:

Os modelos de linhas de transmissão disponíveis no ATP atendem às necessidades mais frequentes dos estudos de transitórios. No entanto, a modelagem rigorosa das linhas de transmissão deve incluir a variação dos parâmetros com a frequência, de forma a evitar imprecisões nos resultados. O programa ATP permite a modelagem de linhas de transmissão com seus parâmetros em função da frequência através de duas opções: o modelo JMARTI e o modelo SEMLYEN, os quais por sua vez utilizam técnicas

distintas para alcançar o mesmo objetivo. O modelo utilizado neste trabalho foi o modelo JMARTI (MARTI, 1988). Os dados para a linha de transmissão foram fornecidos por (ANDERSON, 1999) e são listados na Tabela 6.2 a seguir.

Tabela 6.2: Parâmetros utilizados na modelagem da linha de transmissão.

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
Resistência de Seqüência Zero	0.7186	Ohms
Resistência de Seqüência Positiva	0.3101	Ohms
Indutância de Seqüência Zero	11.45	mH
Indutância de Seqüência Positiva	2.41	mH

A configuração física da torre utilizada para a modelagem da linha de transmissão é ilustrada na Figura 6.7.

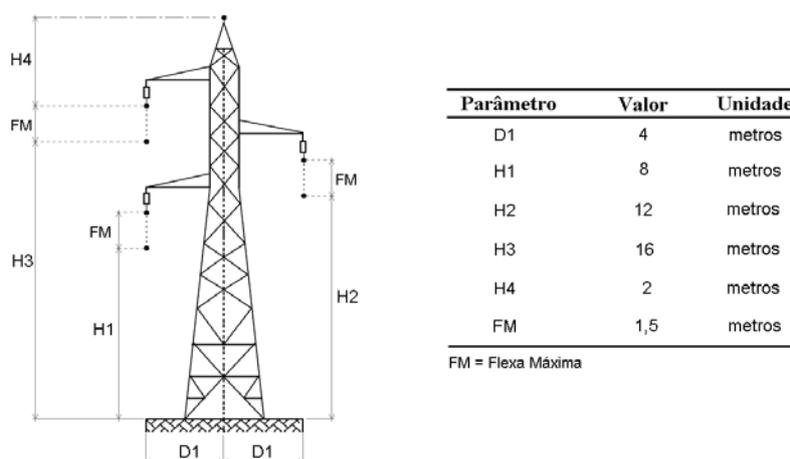


Figura 6.7: Torre utilizada na modelagem do sistema de transmissão de 138 kV.

## F Carga Elétrica Conectada no Fim da Linha de Transmissão:

A carga indutiva conectada no final da linha de transmissão foi simulada com três valores diferentes: uma carga considerada leve de 3 MVA, uma carga considerada média de 10 MVA e uma carga considerada elevada de 25 MVA. A tabela 6.3 resume os valores de resistência e indutância para cada uma das cargas utilizadas nas simulações.

Tabela 6.3: Cargas utilizadas nas simulações no ATP/EMTP.

Carga	Potência (MVA)	Z ( $\Omega$ )	R ( $\Omega$ )	X <sub>L</sub> ( $\Omega$ )	$\theta$ ( $^\circ$ )
1	3	6348	5840,16	2487,89	23,07
2	10	1904.4	1752.04	746.36	23,07
3	25	761.76	700.82	298.54	23,07

## 6.3 Simulações Realizadas

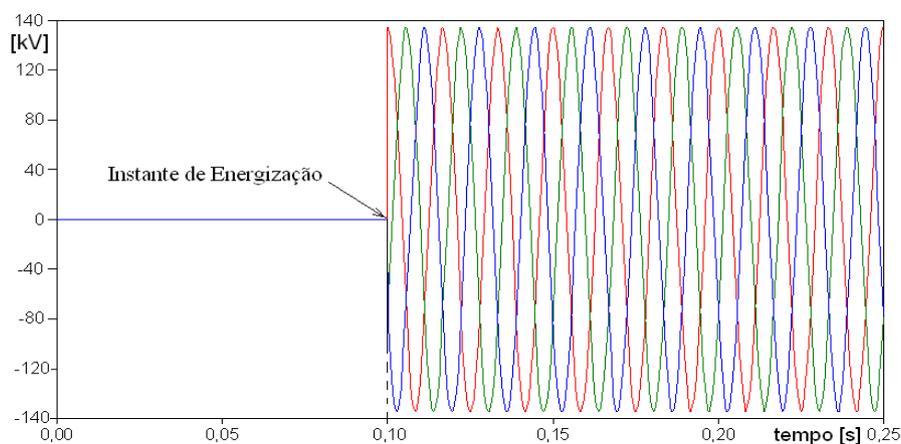
### 6.3.1 Representação dos Fenômenos Estudados

O algoritmo de proteção proposto neste trabalho opera com base na análise dos sinais de corrente diferencial trifásica. Desse modo, as simulações realizadas sob o sistema elétrico representado na Figura 6.1 se concentram nas seguintes situações:

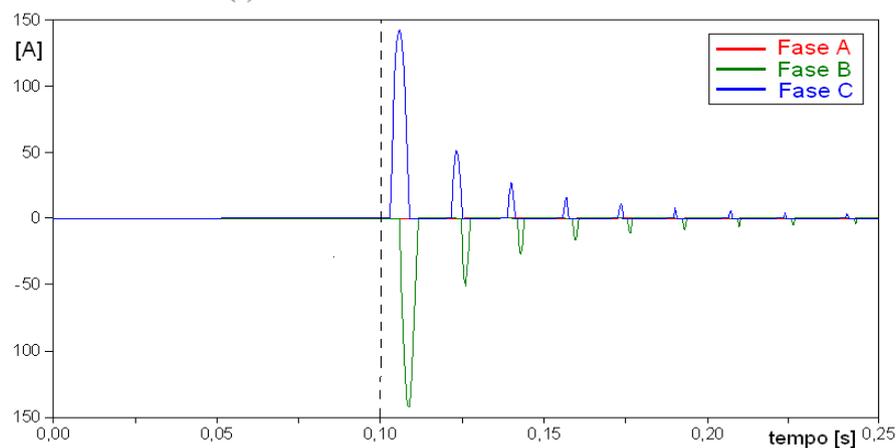
1. Energização do transformador;
2. Energização do transformador com a presença de faltas internas;
3. Faltas internas entre o enrolamento do transformador e a terra, em ambos os lados do transformador;
4. Faltas monofásicas e trifásicas externas ao transformador;
5. Faltas aplicadas entre o transformador e os TCs;
6. Remoção de faltas externas.

### 1º Energização do transformador

Este procedimento de manobra consiste em fechar o interruptor  $S_1$  do lado primário do transformador de potência, representado na Figura 6.1, com o lado secundário em aberto, sem carga. Essa operação ocasiona uma mudança no comportamento das tensões e correntes no secundário do transformador produzindo uma corrente diferencial importante. A Figura 6.8.a ilustra o comportamento das tensões no enrolamento secundário do transformador de potência, ponto 2 na Figura 6.1, quando uma energização trifásica acontece em 0.1 segundos de simulação. A Figura 6.8.b apresenta as correntes diferenciais medidas pelo relé de proteção, nas quais se observa a importante magnitude atingida por essa corrente. Essa magnitude fará com que a corrente de ativação do algoritmo de proteção ultrapasse o valor limiar e ative o bloco 2 do algoritmo proposto. Esses sinais de tensão e corrente foram obtidos considerando um tempo total de simulação de 0.25 segundos.



(a) Tensão no lado secundário do transformador.



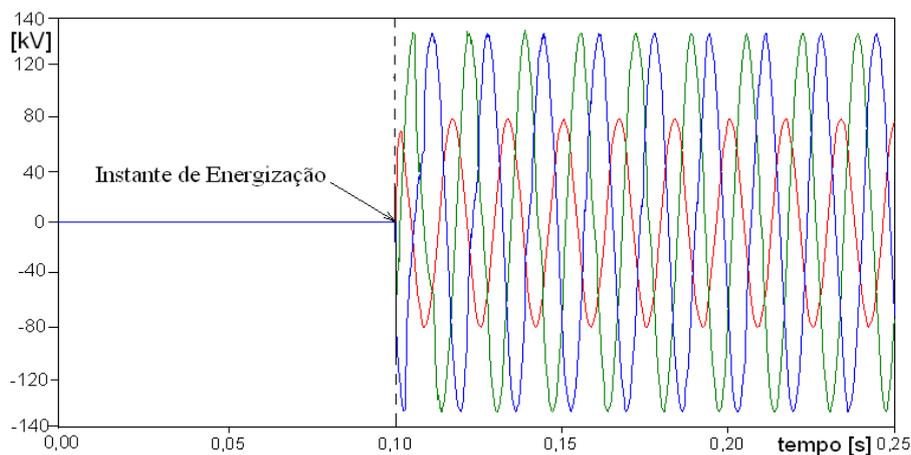
(b) Correntes medidas pelo relé diferencial.

Figura 6.8: Energização do transformador em 0.1 segundos nas Fases A, B e C.

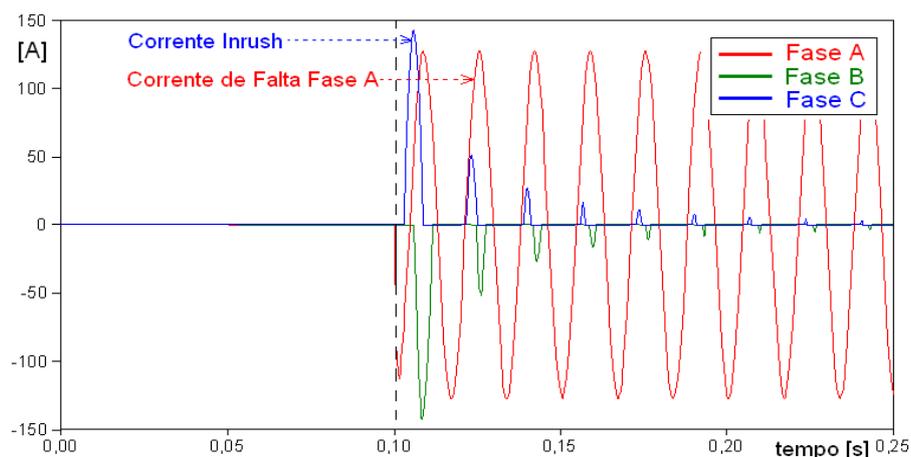
## 2° Energização do transformador na presença de falta interna

Simula-se o fechamento do interruptor  $S_1$  do primário do transformador com o lado secundário em aberto, simultaneamente com o fechamento da chave de curto-circuito  $S_4$  (indicada na Figura 6.1). O curto circuito ocorre entre a *Fase A* do enrolamento secundário do transformador e a *Terra*.

Na Figura 6.9.a, se apresenta o comportamento das tensões secundárias do transformador quando da ocorrência da falta *Fase A - Terra* junto a uma condição de energização, acontecendo ambas em 0.1 segundos de simulação. A tensão na fase faltosa sofre uma queda de tensão provocada pelo fluxo de corrente de curto-circuito à terra. Na Figura 6.9.b, se pode notar as magnitudes, quase iguais, das correntes diferenciais produzidas pela falta interna (*Fase A*) e pela energização do transformador (*Fases B e C*). Note-se que a corrente diferencial *inrush* na *Fase C* atinge um valor superior ao valor atingido pela corrente diferencial de falta interna na *Fase A*. Isso mostra a importância da consideração das correntes inrush no esquema de proteção diferencial. A simulação apresentada foi feita considerando uma resistência de falta de  $R_f = 10 \Omega$ .



(a) Tensão no lado secundário do transformador.



(b) Correntes trifásicas medidas pelo relé diferencial.

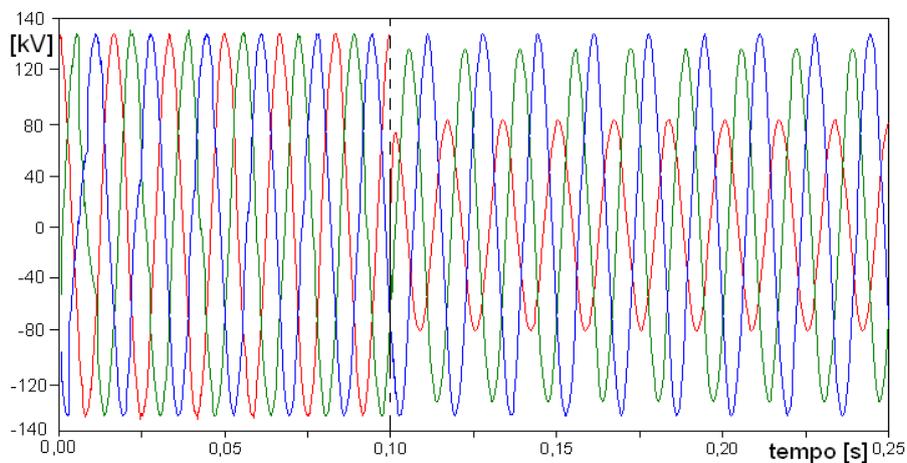
Figura 6.9: Energização do transformador em 0.1 segundos com presença de falta interna entre a Fase A e a Terra com uma  $R_f = 10 \Omega$ .

### 3º Faltas internas entre o enrolamento secundário do transformador e a terra

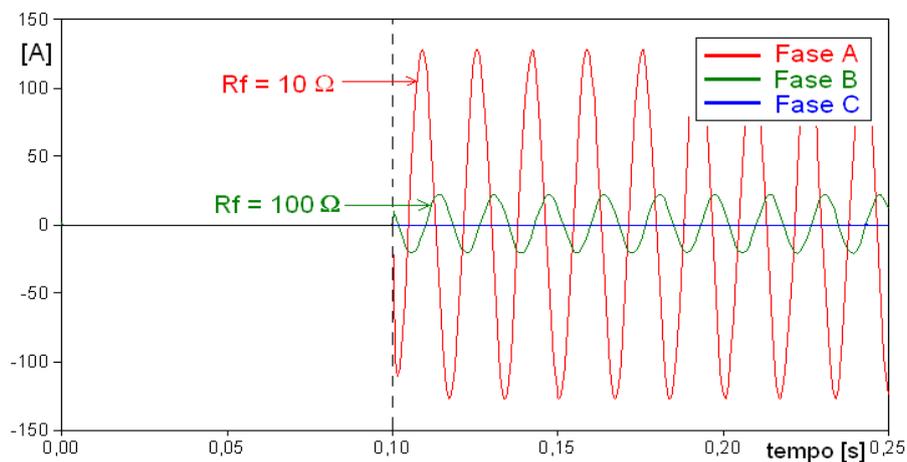
Nesta simulação, a chave de curto-circuito,  $S_4$  na Figura 6.1, conecta o 100% do enrolamento secundário do transformador de potência com a terra através de uma resistência de falta  $R_f$ .

A Figura 6.10.a ilustra as tensões no enrolamento secundário do transformador quando há um curto-circuito (falta interna) entre as *Fases A, B e Terra*. Observa-se a queda de tensão nas *Fases A e B* devido à corrente de curto-circuito no enrolamento do transformador. A Figura 6.10.b, apresenta as correntes diferenciais trifásicas medidas no circuito diferencial. Nessa simulação o curto-circuito foi simulado entre as *Fases A-B* e a *Terra* considerando uma resistência de falta na *Fase A* de  $10 \Omega$  e na *Fase B* de  $100 \Omega$ .

Na Figura 6.10.b, pode-se notar a influência da resistência de falta  $R_f$  sob a magnitude das correntes de falta.



(a) Tensão no lado secundário do transformador.



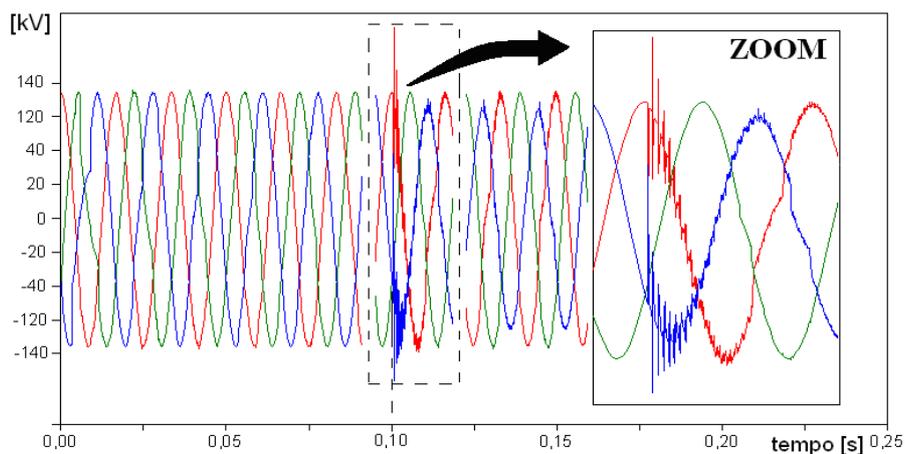
(b) Correntes trifásicas medidas pelo relé diferencial.

Figura 6.10: Condição de falta interna bifásica entre as Fases A, B e Terra com resistências de falta de:  $R_{fA} = 10 \Omega$  e  $R_{fB} = 100 \Omega$ .

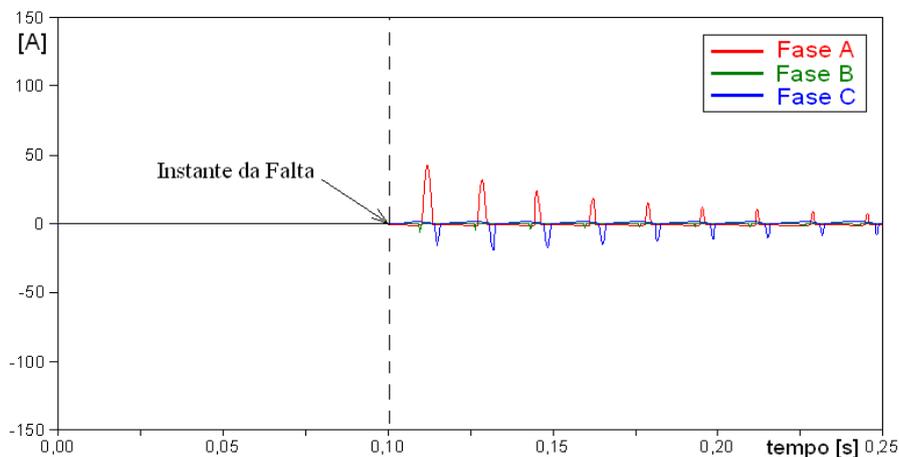
#### 4° Faltas externas aplicadas no lado secundário do transformador

Nesta condição, a falta foi simulada como um curto-circuito na linha de transmissão entre as *Fases A-C e Terra* através de uma resistência de falta de  $0.1 \Omega$ .

A Figura 6.11.a ilustra o comportamento das tensões no lado secundário do transformador quando a falta bifásica-terra acontece a uma distância de 30 km da subestação transformadora. Os transitórios de curta duração gerados nas tensões secundárias do transformador de potência quando da ocorrência de uma falta externa, são destacados na parte Figura 6.11.a. Na Figura 6.11.b pode-se notar a pequena magnitude das correntes trifásicas no relé diferencial.



(a) Tensão no lado secundário do transformador.



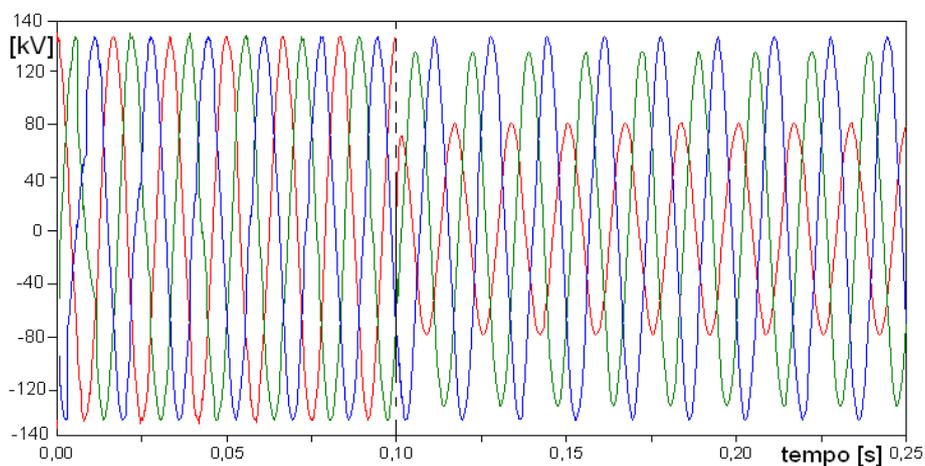
(b) Correntes trifásicas medidas pelo relé diferencial.

Figura 6.11: Condição de falta externa no lado secundário do transformador entre as Fases A e C com uma  $R_f = 0.1 \Omega$ .

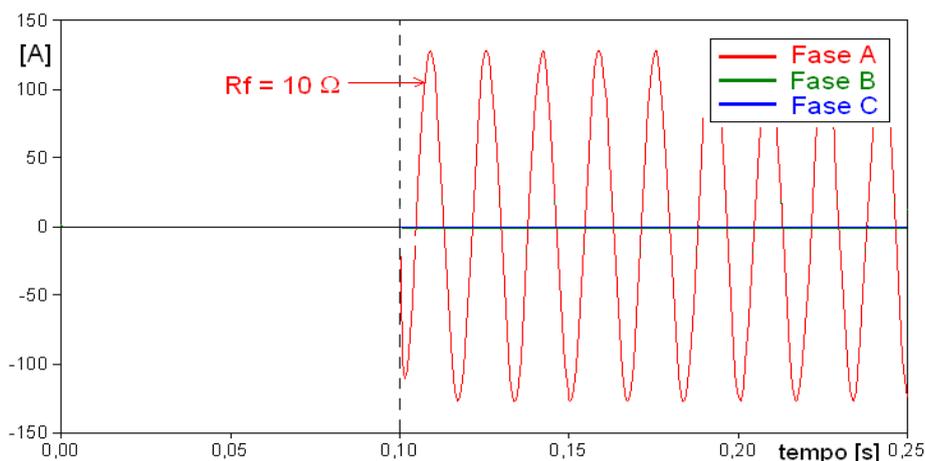
### 5° Falta externa aplicada entre o transformador e o TC secundário

Esta simulação é realizada objetivando avaliar o desempenho do algoritmo de proteção perante faltas que acontecem entre os terminais do transformador e os TCs. Esse tipo de falta não se classifica como uma falta interna ao transformador, mas mesmo assim, é uma falta que acontece dentro da zona de proteção dos TCs, fato que torna necessário a atuação do relé diferencial. A falta foi simulada entre a *Fase A* e *Terra* entre o enrolamento secundário do transformador de potência e o TC, no ponto **2** do sistema elétrico ilustrado na Figura 6.1.

Na Figura 6.12.a, ilustra o comportamento das tensões no secundário do transformador quando a falta externa acontece em 0.1 segundos de simulação. A magnitude da corrente diferencial da *Fase A* atinge um valor importante se comparada com as outras correntes diferenciais. Isso é observado na Figura 6.12.b onde se mostra a amplitude das correntes diferenciais.



(a) Tensão no lado secundário do transformador.



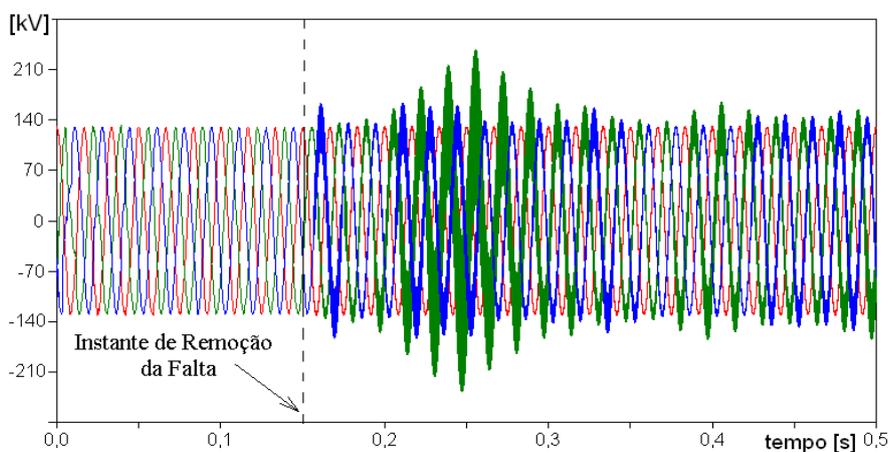
(b) Correntes trifásicas medidas pelo relé diferencial.

Figura 6.12: Condição de falta Fase-Terra entre o terminal secundário do transformador e o TC através de uma  $R_f = 10 \Omega$ .

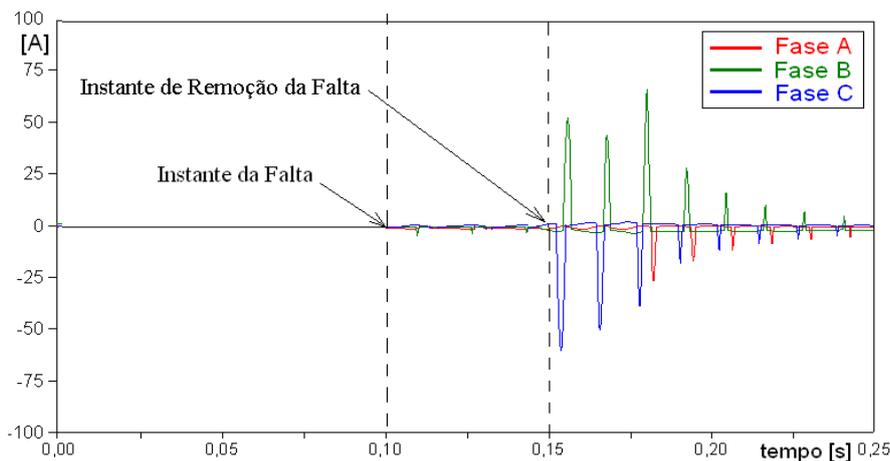
## 6º Remoção de falta externas ao transformador

Considere-se que a falta acontece em 0.1 segundos de simulação e a uma distância de 3 km da subestação transformadora. Após a falta acontecer, ela é removida do sistema em 0.05 segundos e as tensões nos terminais do transformador sofrem uma distorção importante, fato que produz uma corrente diferencial de características muito similares à corrente *inrush* de energização.

Na Figura 6.13.a, apresenta-se o comportamento transitório das tensões no enrolamento secundário do transformador de potência quando a falta externa é removida. Na Figura 6.13.b podem-se enxergar as correntes diferenciais medidas pelo relé de proteção. A remoção de uma falta externa próxima ao transformador pode provocar operações incorretas do relé de proteção.



(a) Tensão no lado secundário do transformador.



(b) Correntes trifásicas medidas pelo relé diferencial.

Figura 6.13: Condição de remoção de falta externa ao transformador em 0.15 segundos.

### 6.3.2 Número de Casos Estudados

Uma avaliação completa e rigorosa do algoritmo de proteção proposto foi feita neste trabalho 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 casos operacionais e de falta utilizando o software ATP/EMTP a fim de estudar e avaliar a maioria das combinações possíveis para os casos de interesse. Nas tabelas 6.4 e 6.8 são apresentadas as combinações de casos de simulação utilizados na geração do conjunto de dados das situações envolvidas com este trabalho.

A tabela 6.4 mostra, de forma resumida, a combinação de parâmetros utilizados na simulação dos casos de energização do transformador, onde vários casos foram simulados. A tabela 6.5, mostra os parâmetros utilizados para a elaboração do banco de dados relativo às faltas internas ao transformador, considerando-se faltas: fase-terra, fase-fase e faltas trifásicas de ambos os lados do transformador. Dessa forma, os valores de carga combinaram-se aos valores de resistência de falta  $R_f$  envolvidos na aplicação das faltas e aos valores dos ângulos de inserção das faltas. Na Tabela 6.6 pode-se observar os parâmetros utilizados na formação dos arquivos de dados para casos de faltas ocorrendo entre o transformador eo TC ligado no secundário do transformador de potência. Os valores de carga do sistema foram combinados aos valores de resistência de falta e aos valores dos ângulos de inserção das faltas. Na Tabela 6.7 resumem-se os casos simulados para energização do transformador com a presença de falta interna. Diferentes instantes de energização junto a diferentes situações de falta foram testados. Os valores de tensão do enrolamento primário da primeira coluna combinaram-se com diferentes instantes de energização, através do fechamento das chaves vinculadas com as fases consideradas. A tabela 6.8 apresenta os parâmetros variados para os casos de faltas externas ao transformador de potência. Da mesma forma que em simulações anteriores, nesses casos variou-se a carga, a resistência de falta e o ângulo de inserção da mesma. A seguir, são mostradas as tabelas citadas anteriormente, ilustrando as combinações de parâmetros para a formação de todos os casos constantes no banco de dados utilizado neste trabalho.

Tabela 6.4: Resumo dos casos teste para energização do transformador de potência.

Tensão no Primário do Transformador (kV)	Nº Evento	Instante de fechamento das chaves [seg.] (graus)		
		Fase A	Fase B	Fase C
13.8	1	0.00 (0°)	0.00 (0°)	0.00 (0°)
13.8	2	0.00 (0°)	0.00 (0°)	0.0796 (30°)
13.8	3	0.00 (0°)	0.0796 (30°)	0.0796 (30°)
13.8	4	0.00 (0°)	0.00 (0°)	0.2387 (90°)
13.8	5	0.00 (0°)	0.2387 (90°)	0.2387 (90°)
13.8	6	0.0796 (30°)	0.0796 (30°)	0.0796 (30°)
13.8	7	0.0796 (30°)	0.0796 (30°)	0.1591 (60°)
13.8	8	0.0796 (30°)	0.1591 (60°)	0.1591 (60°)
13.8	9	0.0796 (30°)	0.0796 (30°)	0.2387 (90°)
13.8	10	0.1591 (60°)	0.1591 (60°)	0.00 (0°)
13.8	11	0.1591 (60°)	0.00 (0°)	0.00 (0°)
13.8	12	0.2387 (90°)	0.2387 (90°)	0.0796 (30°)
13.8	13	0.2387 (90°)	0.0796 (30°)	0.0796 (30°)
13.8	14	0.2387 (90°)	0.2387 (90°)	0.1591 (60°)
13.8	15	0.2387 (90°)	0.1591 (60°)	0.1591 (60°)

Tabela 6.5: Casos teste de faltas internas ao transformador.

Tipo de Falta Interna Simulada			Instante da Falta (segundos)			$R_f (\Omega)$
Fase – Terra	Fase – Fase	Trifásica				
Fase A – Terra			0.1	0.35	0.5	0.00
Fase B – Terra			0.1	0.35	0.5	0.00
Fase C – Terra			0.1	0.35	0.5	0.00
	Fases A – B		0.1	0.35	0.5	0.00
	Fases A – C		0.1	0.35	0.5	0.00
	Fases B – C		0.1	0.35	0.5	0.00
		Fases A – B – C	0.1	0.35	0.5	0.00
Fase A – Terra			0.1	0.35	0.5	0.01
Fase B – Terra			0.1	0.35	0.5	0.01
Fase C – Terra			0.1	0.35	0.5	0.01
	Fases A – B		0.1	0.35	0.5	0.01
	Fases A – C		0.1	0.35	0.5	0.01
	Fases B – C		0.1	0.35	0.5	0.01
		Fases A – B – C	0.1	0.35	0.5	0.01
Fase A – Terra			0.1	0.35	0.5	10
Fase B – Terra			0.1	0.35	0.5	10
Fase C – Terra			0.1	0.35	0.5	10
	Fases A – B		0.1	0.35	0.5	10
	Fases A – C		0.1	0.35	0.5	10
	Fases B – C		0.1	0.35	0.5	10
		Fases A – B – C	0.1	0.35	0.5	10
Fase A – Terra			0.1	0.35	0.5	100
Fase B – Terra			0.1	0.35	0.5	100
Fase C – Terra			0.1	0.35	0.5	100
	Fases A – B		0.1	0.35	0.5	100
	Fases A – C		0.1	0.35	0.5	100
	Fases B – C		0.1	0.35	0.5	100
		Fases A – B – C	0.1	0.35	0.5	100

Tabela 6.6: Resumo dos casos teste de faltas ocorrendo entre o transformador e o TC.

Tensão no Primário (kV)	Tipo de Falta Simulada			Instante da Falta (seg.)			$R_f (\Omega)$
	Fase - Terra	Fase - Fase	Trifásica				
13.8	Fase A – Terra			0.1	0.35	0.5	0.00
13.8	Fase B – Terra			0.1	0.35	0.5	0.00
13.8	Fase C – Terra			0.1	0.35	0.5	0.00
13.8		Fases A – C		0.1	0.35	0.5	0.00
13.8		Fases A – B		0.1	0.35	0.5	0.00
13.8		Fases C – B		0.1	0.35	0.5	0.00
13.8			Fases A – B – C	0.1	0.35	0.5	0.00
13.8	Fase A – Terra			0.1	0.35	0.5	0.01
13.8	Fase B – Terra			0.1	0.35	0.5	0.01
13.8	Fase C – Terra			0.1	0.35	0.5	100
13.8		Fases A – C		0.1	0.35	0.5	100
13.8		Fases A – B		0.1	0.35	0.5	100
13.8		Fases C – B		0.1	0.35	0.5	100
13.8			Fases A – B – C	0.1	0.35	0.5	100

Tabela 6.7: Casos teste de energização do transformador com presença de falta interna.

Tensão no Primário (kV)	Instantes de energização			Fases internas faltosas (*)			$R_f$ ( $\Omega$ )
	Fase A	Fase B	Fase C				
13.8	0.0796	0.1591	0.2387	A	T		0.00
13.8	0.1591	0.2387	0.2387	B	T		0.00
13.8	0.2387	0.0796	0.0796	C	T		0.00
13.8	0.2387	0.2387	0.2387	A	B	T	0.00
13.8	0.1591	0.1591	0.1591	A	C	T	0.00
13.8	0.0796	0.0796	0.0796	A	B	C	0.00
13.8	0.0796	0.1591	0.2387	A	T		0.01
13.8	0.1591	0.2387	0.2387	B	T		0.01
13.8	0.2387	0.0796	0.0796	C	T		0.01
13.8	0.2387	0.2387	0.2387	A	B	T	0.01
13.8	0.1591	0.1591	0.1591	A	C	T	0.01
13.8	0.0796	0.0796	0.0796	A	B	C	0.01
13.8	0.0796	0.1591	0.2387	A	T		10
13.8	0.1591	0.2387	0.2387	B	T		10
13.8	0.2387	0.0796	0.0796	C	T		10
13.8	0.2387	0.2387	0.2387	A	B	T	10
13.8	0.1591	0.1591	0.1591	A	C	T	10
13.8	0.0796	0.0796	0.0796	A	B	C	10
13.8	0.0796	0.1591	0.2387	A	T		100
13.8	0.1591	0.2387	0.2387	B	T		100
13.8	0.2387	0.0796	0.0796	C	T		100
13.8	0.2387	0.2387	0.2387	A	B	T	100
13.8	0.1591	0.1591	0.1591	A	C	T	100
13.8	0.0796	0.0796	0.0796	A	B	C	100

(\*) A = Fase A; B = Fase B; C = Fase C, T = Terra.

Tabela 6.8: Casos teste de faltas externas ao transformador.

Instante da Falta (seg.)	Tipo de Falta Externa Simulada			Carga (MVA)	$R_f$ ( $\Omega$ )
	Fase – Terra	Fase – Fase	Trifásica		
0.1	Fase A – Terra			3 10 25	0.00
0.1	Fase B – Terra			3 10 25	0.00
0.1	Fase C – Terra			3 10 25	0.00
0.1		Fases A – B		3 10 25	0.00
0.1		Fases A – C		3 10 25	0.00
0.1		Fases B – C		3 10 25	0.00
0.1			Fases A – B – C	3 10 25	0.00
0.25	Fase A – Terra			3 10 25	0.01
0.25	Fase B – Terra			3 10 25	0.01
0.25	Fase C – Terra			3 10 25	0.01
0.25		Fases A – B		3 10 25	0.01
0.25		Fases A – C		3 10 25	0.01
0.25		Fases B – C		3 10 25	0.01
0.25			Fases A – B – C	3 10 25	0.01
0.35	Fase A – Terra			3 10 25	10
0.35	Fase B – Terra			3 10 25	10
0.35	Fase C – Terra			3 10 25	10

Tabela 6.8: Casos teste de faltas externas ao transformador (Continuação).

Instante da Falta (seg.)	Tipo de Falta Externa Simulada			Carga (MVA)	$R_f$ ( $\Omega$ )		
	Fase – Terra	Fase – Fase	Trifásica				
0.35		Fases A – B		3	10	25	10
		Fases A – C		3	10	25	10
		Fases B – C		3	10	25	10
0.35			Fases A – B – C	3	10	25	10
0.5	Fase A – Terra			3	10	25	100
0.5	Fase B – Terra			3	10	25	100
0.5	Fase C – Terra			3	10	25	100
0.5		Fases A – B		3	10	25	100
0.5		Fases A – C		3	10	25	100
0.5		Fases B – C		3	10	25	100
0.5			Fases A – B – C	3	10	25	100

## 6.4 Resultados Obtidos

### 6.4.1 Casos Analisados

O algoritmo de proteção diferencial de transformadores foi construído como uma seqüência de comandos em ambiente MatLab®. O banco de dados empregado nos testes de desempenho desse algoritmo foi elaborado conforme os casos apresentados anteriormente, os quais foram gerados a partir do sistema elétrico da Figura 6.1. O conjunto total de casos teste simulados foram:

- Energização do transformador;
- Faltas internas ao transformador;
- Energização do transformador com a presença de falta interna;
- Faltas externas ao transformador;
- Faltas ocorrendo entre o transformador e o TC secundário;
- Energização com falta externa.

As tabelas seguintes apresentam os resultados dos testes feitos com o algoritmo de proteção desenvolvido. Os resultados obtidos nos testes foram divididos em três grupos, a saber: desempenho do algoritmo perante variação da resistência de falta  $R_f$ ; desempenho do algoritmo perante variação no valor da carga conectada no final da linha de transmissão; e, por fim, desempenho do algoritmo perante variação da função wavelet (wavelet mãe) utilizada na análise dos coeficientes de detalhe.

Cabe salientar que todos os casos de simulação foram feitos utilizando a interface gráfica apresentada no Capítulo 5 e ilustrada na Figura 5.5.

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

Nas tabelas a serem apresentadas a primeira coluna ilustra 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. Já na terceira e quarta colunas, apresentam-se a quantidade de acertos e erros atingidos pelo algoritmo para cada caso analisado.

Tabela 6.9: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta considerando uma  $R_f = 0.00 \Omega$ .

<b>DESEMPENHO DO AGORITMO DE PROTEÇÃO – TRANSFORMADOR DE 35 MVA</b>			
<b>RESISTÊNCIA DE FALTA = 0.00 <math>\Omega</math></b>			
<b>Casos Testados</b>	<b>Nº Casos</b>	<b>Nº Acertos</b>	<b>Nº Erros</b>
Energização	64	64	0
Faltas Internas	33	33	0
Faltas Externas	33	30	3
Faltas entre Transformador e TC	63	61	2
Energização com Falta Interna	288	282	6
Energização com falta externa	48	46	2
<b>TOTAL</b>	<b>529</b>	<b>516</b>	<b>13</b>
<b>TOTAL (%)</b>	<b>100</b>	<b>97,54</b>	<b>2,5</b>

Tabela 6.10: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta considerando com uma  $R_f = 0.01 \Omega$ .

<b>DESEMPENHO DO AGORITMO DE PROTEÇÃO – TRANSFORMADOR DE 35 MVA</b>			
<b>RESISTÊNCIA DE FALTA = 0.01 <math>\Omega</math></b>			
<b>Casos Testados</b>	<b>Nº Casos</b>	<b>Nº Acertos</b>	<b>Nº Erros</b>
Energização	64	64	0
Faltas Internas	33	33	0
Faltas Externas	33	31	2
Faltas entre Transformador e TC	63	60	3
Energização com Falta Interna	288	280	8
Energização com falta externa	48	46	2
<b>TOTAL</b>	<b>529</b>	<b>514</b>	<b>15</b>
<b>TOTAL (%)</b>	<b>100</b>	<b>97,16</b>	<b>2,84</b>

Tabela 6.11: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta considerando com uma  $R_f = 10 \Omega$ .

<b>DESEMPENHO DO AGORITMO DE PROTEÇÃO – TRANSFORMADOR DE 35 MVA</b>			
<b>RESISTÊNCIA DE FALTA = 10 <math>\Omega</math></b>			
<b>Casos Testados</b>	<b>Nº Casos</b>	<b>Nº Acertos</b>	<b>Nº Erros</b>
Energização	64	63	1
Faltas Internas	33	30	3
Faltas Externas	33	28	5
Faltas entre Transformador e TC	63	60	3
Energização com Falta Interna	288	260	28
Energização com falta externa	48	40	8
<b>TOTAL</b>	<b>529</b>	<b>481</b>	<b>48</b>
<b>TOTAL (%)</b>	<b>100</b>	<b>90,92</b>	<b>9,08</b>

Tabela 6.12: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta considerando uma  $R_f = 100 \Omega$ .

<b>DESEMPENHO DO ALGORITMO DE PROTEÇÃO – TRANSFORMADOR DE 35 MVA</b>			
<b>RESISTÊNCIA DE FALTA = 100 <math>\Omega</math></b>			
<b>Casos Testados</b>	<b>Nº Casos</b>	<b>Nº Acertos</b>	<b>Nº Erros</b>
Energização	64	63	1
Faltas Internas	33	24	9
Faltas Externas	33	28	5
Faltas entre Transformador e TC	63	58	5
Energização com Falta Interna	288	250	38
Energização com falta externa	48	38	10
<b>TOTAL</b>	<b>529</b>	<b>461</b>	<b>68</b>
<b>TOTAL (%)</b>	<b>100</b>	<b>87,14</b>	<b>12,86</b>

O algoritmo de proteção analisado nessa etapa atingiu uma elevada precisão. Identificou-se também uma leve queda de precisão do algoritmo de proteção quando a resistência de falta adota valores mais elevados. Essa queda na precisão deve-se principalmente ao aumento de operações incorretas (erros) quando da energização do transformador junto a uma falta interna. As faltas de alta impedância poderiam produzir uma variação de energia espectral muito similar à variação produzida pela energização, fato que provocaria uma inadequada discriminação do algoritmo de proteção. A Figura 6.14 ilustra a queda de precisão em função da resistência de falta.

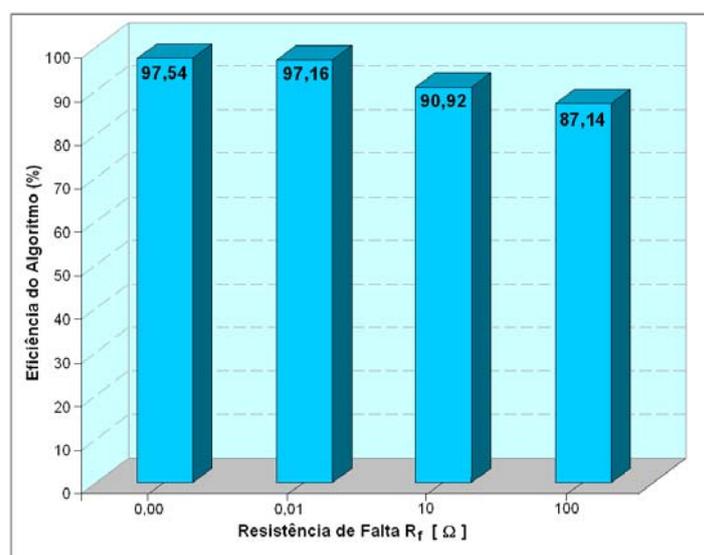


Figura 6.14: Variação da precisão do algoritmo em função da resistência de falta.

### 6.4.3 Desempenho do Algoritmo Perante Variação da Carga

Nas tabelas a seguir apresentam-se os resultados do desempenho obtidos pelo algoritmo de proteção para diferentes condições de carga. Nas simulações feitas, deixou-se a resistência de falta num valor fixo de  $0.01 \Omega$ , objetivando a simulação de faltas sólidas. As cargas utilizadas nos testes foram consideradas em três categorias: 3 MVA (carga leve), 10 MVA (carga media) e 25 (MVA) carga pesada.

Tabela 6.13: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta com uma carga de 3 MVA.

<b>DESEMPENHO DO AGORITMO DE PROTEÇÃO – TRANSFORMADOR DE 35 MVA</b>			
<b>CARGA = 3 MVA</b>			
<b>Casos Testados</b>	<b>Nº Casos</b>	<b>Nº Acertos</b>	<b>Nº Erros</b>
Energização	64	64	0
Faltas Internas	33	32	1
Faltas Externas	33	31	2
Faltas entre Transformador e TC	33	33	0
Energização com Falta Interna	288	287	1
Energização com falta externa	48	47	1
<b>TOTAL</b>	<b>499</b>	<b>494</b>	<b>5</b>
<b>TOTAL (%)</b>	<b>100</b>	<b>98,99</b>	<b>1</b>

Tabela 6.14: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta com uma carga de 10 MVA.

<b>DESEMPENHO DO AGORITMO DE PROTEÇÃO – TRANSFORMADOR DE 35 MVA</b>			
<b>CARGA = 10 MVA</b>			
<b>Casos Testados</b>	<b>Nº Casos</b>	<b>Nº Acertos</b>	<b>Nº Erros</b>
Energização	64	64	0
Faltas Internas	33	31	2
Faltas Externas	33	31	2
Faltas entre Transformador e TC	33	32	1
Energização com Falta Interna	288	285	3
Energização com falta externa	48	45	3
<b>TOTAL</b>	<b>499</b>	<b>488</b>	<b>11</b>
<b>TOTAL (%)</b>	<b>100</b>	<b>97,79</b>	<b>2,21</b>

Tabela 6.15: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial para diferentes situações de falta com uma carga de 25 MVA.

<b>DESEMPENHO DO AGORITMO DE PROTEÇÃO – TRANSFORMADOR DE 35 MVA</b>			
<b>CARGA = 25 MVA</b>			
<b>Casos Testados</b>	<b>Nº Casos</b>	<b>Nº Acertos</b>	<b>Nº Erros</b>
Energização	64	64	0
Faltas Internas	33	30	3
Faltas Externas	33	30	3
Faltas entre Transformador e TC	33	32	1
Energização com Falta Interna	288	285	3
Energização com falta externa	48	44	4
<b>TOTAL</b>	<b>499</b>	<b>485</b>	<b>14</b>
<b>TOTAL (%)</b>	<b>100</b>	<b>97,19</b>	<b>2,81</b>

A precisão do algoritmo perante mudanças na carga ligada no final da linha de transmissão não acusou uma variação importante. Observa-se, na Figura 6.15, que a precisão para os três tipos de cargas conectadas manteve-se praticamente igual.

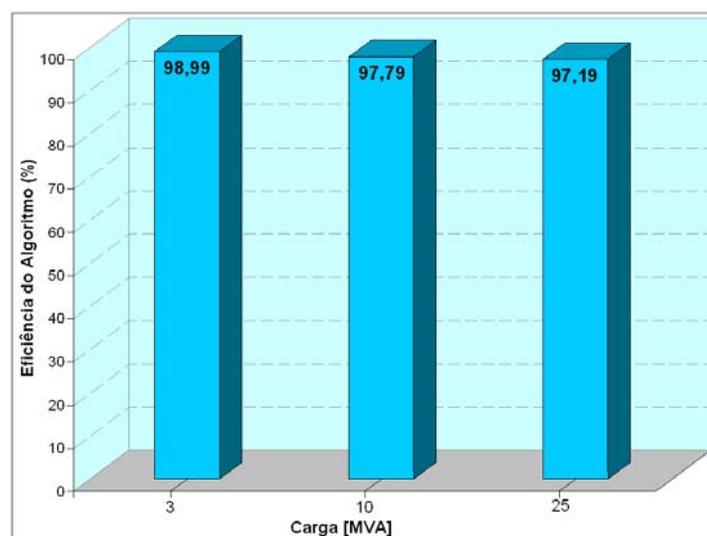


Figura 6.15: Variação da precisão do algoritmo em função da carga conectada.

#### 6.4.4 Desempenho do Algoritmo Perante Variação da Wavelet Mãe e Comparação com a Técnica Convencional de Proteção Diferencial

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 a escolha da função janela da Análise Rápida de Fourier, 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 três tipos diferentes de wavelet mãe, as quais foram: *Daubechies*, *Haar* e *Symlet*. A escolha dessas três categorias foi determinada por causa de sua maior aplicação nos Sistemas Elétricos de Potência sendo essas três, as mais utilizadas (FERNADEZ CASTRO et al., 2002).

Tabela 6.16: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial considerando a wavelet mãe tipo Daubechies.

<b>DESEMPENHO DO ALGORITMO DE PROTEÇÃO – TRANSFORMADOR DE 35 MVA</b>			
<b>Wavelet Mãe = Daubechies</b>			
<b>Casos Testados</b>	<b>Nº Casos</b>	<b>Nº Acertos</b>	<b>Nº Erros</b>
Energização	64	63	1
Faltas Internas	132	129	3
Faltas Externas	64	63	1
Faltas entre Transformador e TC	84	82	2
Energização com Falta Interna	384	350	34
Energização com falta externa	64	63	1
<b>TOTAL</b>	<b>792</b>	<b>750</b>	<b>42</b>
<b>TOTAL (%)</b>	<b>100</b>	<b>94,7</b>	<b>5,3</b>

Tabela 6.17: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial considerando a wavelet mãe tipo Haar.

<b>DESEMPENHO DO AGORITMO DE PROTEÇÃO – TRANSFORMADOR DE 35 MVA</b>			
<b>Wavelet Mãe = Haar</b>			
<b>Casos Testados</b>	<b>Nº Casos</b>	<b>Nº Acertos</b>	<b>Nº Erros</b>
Energização	64	11	53
Faltas Internas	132	24	108
Faltas Externas	64	16	48
Faltas entre Transformador e TC	84	14	70
Energização com Falta Interna	384	55	329
Energização com falta externa	64	13	51
<b>TOTAL</b>	<b>792</b>	<b>133</b>	<b>659</b>
<b>TOTAL (%)</b>	<b>100</b>	<b>16,79</b>	<b>83,21</b>

Tabela 6.18: Desempenho do algoritmo de proteção diferencial considerando a wavelet mãe tipo Symlet.

<b>DESEMPENHO DO AGORITMO DE PROTEÇÃO – TRANSFORMADOR DE 35 MVA</b>			
<b>Wavelet Mãe = Symlet</b>			
<b>Casos Testados</b>	<b>Nº Casos</b>	<b>Nº Acertos</b>	<b>Nº Erros</b>
Energização	64	58	6
Faltas Internas	132	112	20
Faltas Externas	64	55	9
Faltas entre Transformador e TC	84	75	9
Energização com Falta Interna	384	336	48
Energização com falta externa	64	56	8
<b>TOTAL</b>	<b>792</b>	<b>692</b>	<b>100</b>
<b>TOTAL (%)</b>	<b>100</b>	<b>87,37</b>	<b>12,63</b>

Na Tabela 6.19 apresenta-se o desempenho total de cada uma das funções wavelet testadas quando comparadas com a Técnica Tradicional de Fourier (FTT). Lembremos que a análise de Fourier baseia-se na magnitude de 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 de um fenômeno de energização (ANDERSON, 1999).

Tabela 6.19: Desempenho comparativo das wavelets mães testadas.

<b>DESEMPENHO TOTAL DAS FUNÇÕES WAVELET TESTADAS</b>			
<b>Wavelet Mãe</b>	<b>Tipo de Distúrbio</b>	<b>Operações Corretas (%)</b>	
		<b>Metodologia proposta</b>	<b>Metodologia tradicional</b>
Daubechies	Falta Externa	98,43	98,00
	Falta Interna	97,73	85,50
	Corrente Inrush	98,43	75,21
	Falta Interna + Energização	91,14	81,32
Haar	Falta Externa	25,00	98,00
	Falta Interna	18,18	85,50
	Corrente Inrush	17,18	75,21
	Falta Interna + Energização	14,32	81,32
Symlet	Falta Externa	84,84	98,00
	Falta Interna	85,94	85,50
	Corrente Inrush	90,62	75,21
	Falta Interna + Energização	87,50	81,32

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. A wavelet mãe *Symlet* mostrou-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. A Figura 6.16 mostra uma comparação entre os diferentes tipos de funções wavelet utilizadas neste trabalho. Pode-se observar que a Técnica de Análise Tradicional de Fourier (FTT) obteve uma eficiência menor que a metodologia de proteção desenvolvida utilizando uma wavelet *Daubechies*.

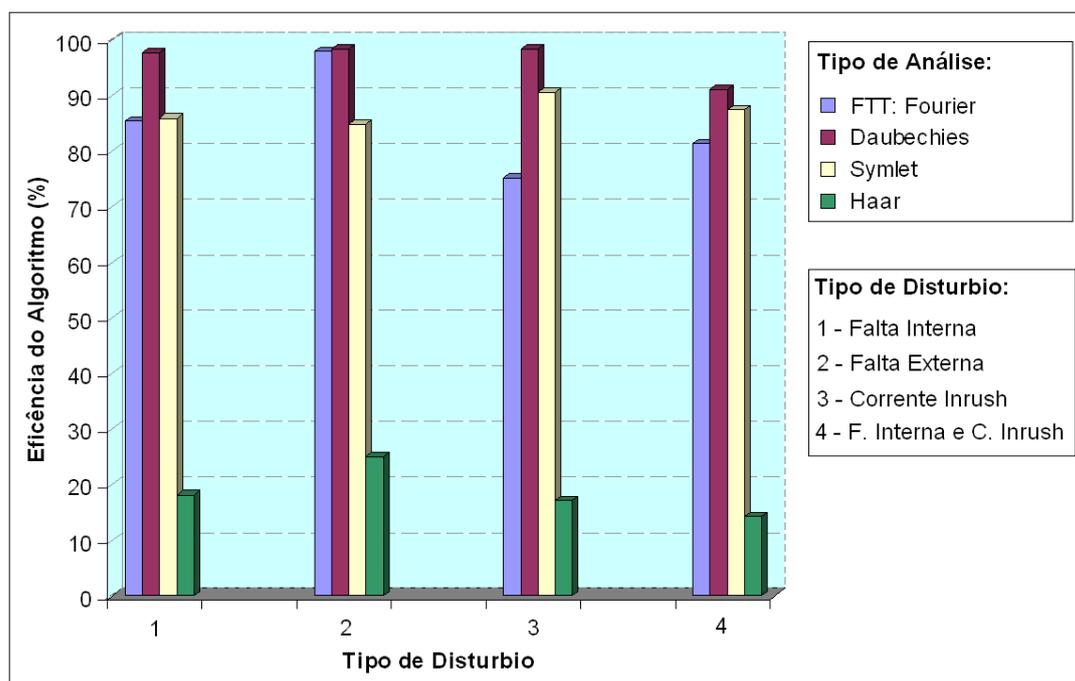


Figura 6.16: Eficiência das wavelet mãe testadas e comparação com a análise tradicional de Fourier.

## 6.5 Resumo

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 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 e da função wavelet utilizada na análise. Uma comparação da metodologia proposta com a metodologia de proteção convencional foi desenvolvida também neste capítulo.

## 7 CONCLUSÕES

A Proteção Diferencial Convencional de Transformadores de Potência apresenta uma eficiência limitada quando da ocorrência dos fenômenos transitórios em Sistemas Elétricos de Potência. As primeiras metodologias utilizadas para aumentar a eficiência da proteção diferencial não conseguiram atender totalmente aos problemas desta, obtendo um nível não ótimo de eficiência operacional. Entre as metodologias propostas, destacam-se: a utilização do relé diferencial percentual, a análise de distúrbios através da Transformada de Fourier mediante a restrição de harmônicas e a utilização de Redes Neurais Artificiais como metodologia de discriminação dos distúrbios.

Esta dissertação teve como foco principal contribuir com o esquema de proteção diferencial para transformadores de potência através do desenvolvimento e construção de um algoritmo digital que ajude na tomada de decisões do relé de proteção. Essa metodologia de proteção baseia-se na avaliação da variação de energia espectral dos coeficientes wavelet perante o acontecimento de um distúrbio. A análise dos sinais de corrente diferencial é feita após a decomposição deste sinal em várias faixas de frequência através da Transformada Wavelet Discreta.

A metodologia de proteção proposta foi implementada através de uma interface gráfica construída em ambiente MatLab® e testada através de simulações computacionais mediante o *software* ATP/EMTP. A modelagem de um Sistema Elétrico de Transmissão de 138 kV, contendo um transformador de 35 MVA, permitiu a simulação de diversas manobras e distúrbios entre os quais se simulou: condições de energização, faltas internas ao transformador, energização com falta interna, faltas externas na linha de transmissão, e por fim, condições de eliminação de faltas externas. Com base nesses testes e após a avaliação crítica do algoritmo de proteção desenvolvido neste trabalho, diversas conclusões puderam ser observadas:

- 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 do entorno das empresas construtoras, fato que dificulta a obtenção de dados para a modelagem da máquina.
- A utilização da Transformada Wavelet para o estudo dos sinais diferenciais transitórios produzidos pelos distúrbios e manobras que acontecem sob os transformadores de potência mostrou-se como uma ferramenta eficiente e

robusta, fornecendo um ótimo desempenho ao algoritmo desenvolvido neste trabalho.

- A variação de energia espectral dos coeficientes wavelets mostrou-se como um parâmetro de discriminação eficiente dado a alta capacidade para detectar a causa da corrente diferencial transitória.
- O algoritmo de proteção desenvolvido neste trabalho apresenta uma boa perspectiva de aplicação prática, dada a simplicidade teórica na qual se baseia a metodologia de discriminação dos distúrbios. Além disto, acredita-se que a construção computacional simples, através de softwares fáceis de programar, permitirá a adaptação desse algoritmo como uma sub-rotina do programa principal de decisão lógica de um relé diferencial convencional.
- Com base nos testes realizados, notou-se que o aumento da resistência de falta  $R_f$  quando da ocorrência de faltas internas ao transformador produz uma leve queda na eficiência do algoritmo de proteção.
- A variação da carga conectada no final da linha de transmissão, não apresentou inconveniente para o desempenho da metodologia proposta.
- Realizou-se neste trabalho uma análise da influência que tem sob o algoritmo o uso de diferentes funções wavelets (wavelets mãe). As comparações de desempenho feitas entre as wavelet do tipo: Daubechies, Symlet e Haar mostraram que a utilização da wavelet do tipo Daubechies é a mais adequada para esse estudo.
- O estudo comparativo feito com a metodologia de proteção proposta mostrou um ótimo desempenho do algoritmo desenvolvido neste trabalho quando comparado com a metodologia de proteção diferencial convencional. Nesse contexto, a elevada eficiência operacional atingida mostra a vantagem que a Análise Wavelet apresenta em relação a outras ferramentas de diagnóstico.

É importante salientar que todos os estudos apresentados nesta dissertação foram baseados em simulações realizadas sob um modelo de sistema elétrico composto por um gerador, um transformador de potência, um trecho de linha de transmissão e uma carga. A aplicação dessa metodologia dentro de um sistema elétrico real que permita testar o desempenho do algoritmo sob um transformador de potência submetido a manobras e falhas em tempo real permitirá validar os resultados obtidos neste trabalho, além de detectar eventuais limitações em relação ao desempenho da metodologia.

No entanto, considera-se que a metodologia de proteção diferencial para transformadores de potência desenvolvida e apresentada neste trabalho torna-se relevante para futuros projetos, testes e análises desses equipamentos considerando que os resultados obtidos poderiam ser utilizados em futuras aplicações dos esquemas de proteção diferencial. Além disso, a metodologia, como apresentada, torna-se uma opção atraente para as companhias elétricas na solução dos problemas encontrados na área de proteção dos sistemas elétricos de potência.

## 7.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

O ótimo desempenho apresentado pelo algoritmo de proteção nos testes realizados não é fato suficiente para generalizar a eficiência da metodologia desenvolvida nesta dissertação. As simulações realizadas sob o sistema elétrico considerado nos testes não abrangem toda a gama de distúrbios ao qual um transformador de potência geralmente fica submetido. Além disso, diferentes configurações elétricas apresentam-se nos sistemas de transmissão reais, fato que torna muito específicos os testes realizados com a metodologia de proteção. Assim, como propostas de continuidade desta pesquisa, são sugeridas as seguintes questões:

- Análise do desempenho do algoritmo em diferentes configurações de sistemas elétricos considerando, por exemplo, transformadores de potência com outras características, diferentes níveis de tensão de transmissão e a aplicação da metodologia quando da ocorrência de faltas em linhas de distribuição.
- Avaliação do algoritmo quando da utilização de transformadores em paralelo.
- Avaliação do algoritmo de proteção para outros tipos de distúrbios, a saber: rejeição de cargas, energização de banco de capacitores, eliminação de faltas externas próximas ao transformador.
- Consideração de faltas incipientes em diferentes percentagens dos enrolamentos do transformador. Nesse sentido, sugere-se a avaliação de faltas internas acontecendo em 10%, 30%, 50% e 75% do comprimento total do enrolamento.
- 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.

## 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, NJ, v. 43, n. 4, p. 1425-1428, Apr. 2007.

ADIELSON, T.; CARLSON, A.; MARGOLIS, H. B. et. al. Resonant Overvoltages in EHV Transformers –Modeling and Application. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v. PAS-100, p. 3563-3572, July 1981.

AGGARWALL, R.; KIM, C. H. Wavelet Transform in Power Systems: part 1 –general introduction to the wavelet transforms. **Power Engineering Journal**, United Kingdom, v. 14, n. 2; p. 81-87, Apr. 2000.

ALMEIDA, P.; PRADA, R. **Esquemas de Proteção de Sistemas de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: EPUB, 2005. 308 p. ISBN: 85-87098-56-X.

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

AVILA-ROSALES J.; ALVARADO, F. L. Nonlinear Frequency Dependent Transformer Model for Electromagnetic Transient Studies in Power Systems. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v. PAS-101, n. 11, p. 4281-4288, Nov. 1982.

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

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

BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION. **Aternative Transient Program: ATP-EMTP**. Portland, OR, 2007.

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

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

CABRAL, S. L. E. **Análise de Transitórios Elétricos em Transformadores Através do Método TLM**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

CAMINHA, A. C. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1997. 211 p. ISBN: 85-212-0136-2.

CASTILHO, J. E.; PEREIRA R. JR., A. J. Um Estudo Comparativo Entre a Análise de Fourier e Análise Wavelet. **FAMAT em Revista**, n. 5, 2005.

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, NJ, 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. In: PHYSICAL SOCIETY, 1949 **Proceedings...** [S.l.], v. 62, p. 101-111, 1949.

CHIMKLAI, S.; MARTI, J. R. Simplified Three-phase Transformer Model for Electromagnetic Transients Studies. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v. 10, n. 3, p. 1316-1325, July 1995.

COSTA, F. B.; SILVA, K. M.; DANTAS, M. C. A Wavelets-Based Algorithm for Disturbance Detection Using Oscillographic Data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS –IPST, June 2007, Lyon, France. **Proceedings...** Piscataway, NJ: IEEE, 2007.

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

DE LEON, F.; SEMLYEN, A. Reduce Order Model for Transformer Transients. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v. 7, n. 1, p. 361-369, Jan. 1993.

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

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

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

DOS SANTOS, C. I. **Modelagem do Relé de Proteção Diferencial Tipo BDD15B-GE**. 2006, 87 fls. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

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

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

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, NJ, v. 21, n. 4, p. 1989-1996, Oct. 2006.

FERNADEZ CASTRO, R. M.; DÍAZ ROJAS, H. N. An Overview of Wavelet Transform Application in Power Systems. In: POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE, 14. -PSCC, Sevilla. **Anais...Sevilla**, 2002.

FOLKERS, R. **Determine Current Transformer Suitability Using EMTP Models**. WA USA: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, 1999.

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

GREENE, J. D.; GROSS, C. A. Nonlinear Modeling of Transformers. **IEEE Transaction on Industry Application**, Piscataway, NJ, v. 24, n. 3, p. 434-438, June 1988.

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

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

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

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

HASMAN, T. Reflection and Transmission of Traveling Waves on Power Transformer. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v. 12, n. 4, p. 1648-1689, Oct. 2002.

HAYT JR, W. H. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: LTC –Livros Técnicos e Científicos Editora S. A.m 1983. 403 p. ISBN: 85-216-0278-2.

HAYKIN, S.; VEEN, B. V. **Sinais e Sistemas**. Porto Alegre, RS, Brasil: Bookman, 2001.

HE, J. H.; et al. Transformer Protection Based on Fault Transient Detection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 2006. **Proceedings...** [S.1.], IEEE ISSN 1-4244-0111-9/06, 2006.

HERSZTERG, K. S. **Desenvolvimento de um Modelo Matemático para Enrolamentos de Transformadores: uma abordagem analítica da resposta em frequência.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

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

IEEE Standard. **IEEE Std C57.13-1993:** requirements for instrument transformers. New York, Mar. 194. Revision of IEEE Std C57.13-1978.

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

KANASHIRO, A. G.; PIANTINI, A.; BURANI, G. F. **Modelo de Transformador de Distribución Trifásico para Estudos de Máximos de Tensión (Peaks) Ocasionados por Descargas Atmosféricas.** Disponível em: <<http://www.scielo-test.conicyt.cl/>>. Acesso em: dezembro de 2008.

KASZTENNY, B.; KEZUNOVIC, M. Digital Relay Improve Protection of Large Transformer. **IEEE Computer Application in Power**, [S.1.], ISSN 0895-0156/97, p. 39-45, Oct. 1998.

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

KENNEDY, B. W. **Energy Efficient Transformer.** New York: McGraw-Hill, 1998. 271 p. 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, NJ, v. 9, n. 1, p. 405-413, Jan. 1994.

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

KOLLA, S. R. Digital Protection of Power Transformer Using Artificial Neural Network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCE IN INSTRUMENTATION AND CONTROL, 2. 2005, USA. **Proceeding...**Instrument Society of America Research, Triangle park, v. 50, p. 141-150, 1995.

KUMAR, N. P.; et al. 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, TN, USA. **Proceeding of the IEEE** [S.1.], ISSN 0-7803-9257-4/05, v. 1, p. 140-143, Oct. 2005.

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, Japan. **Proceeding...** Sapporo, Japan, p. 871-874, Oct. 2004.

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. **Proceeding of IEEE**, [S.1.], v. 1, p. 448-452, Oct. 2005.

LI, Q.; CHAN TAT WAI, D. Investigation of Transformer Inrush Current Using A Dyadic Wavelet. **IEEE Catalogue N: 98EX137**, 0-7803-4495-2, p.426-429, 1998.

LIN, C. E.; CHENG, C. L.; HUANG, C. L.; YEH, J. C. Investigation of Magnetizing Inrush Current in Transformer. Part I: Numerical Simulation. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v. 8, n. 1, p. 246-254, Jan. 1993.

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

LING, P. C. Y.; BASAK, A. A New Detection for Realisation of Magnetising Inrush Current in Transformer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON VOLUME, 1989. **Proceeding of IEEE**, [S.1.], p. 239-243, Apr. 1989.

MALLAT, D. C. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. **IEEE Transaction on Patter Anal. Machine Intelligence**, [S.1.], v. 11, p. 674-693, July 1989.

MARTI, L. Simulation of Transient in Underground Cables with Frequency-Dependent Modal Transformation Matrices. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v. 3, n. 3, p. 1099-1110, 1988.

MARTINEZ, E. V.; PÉREZ RODRÍGUEZ, J. A. Aplicación de RNA en la Identificación de Corrientes de Inrush en Transformadores. **Ingenierías**, [S.1.], Piscataway, NJ, v. VI, n.20, p. 24-33, Jul./Sep. 2003.

MARTINEZ, J. A.; MORRIS, B. A. Transformer Modeling for Low- and Mid- Frequency Transient -A Review. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v. 20, n. 2, p. 1625-1632, Apr. 2005.

MARTINEZ, J. A.; et al. Parameter Determination for Modeling System Transients - Part III: transformers. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v. 20, n. 3, p. 2051-2062, July 2005.

MATLAB. **The Language of Technical Computing**. [S.1.], The Mathworks, 2002.

MAO, P. L.; BO, Z. Q.; AGGARWAL, R. K.; LI, R. M. Identification of Electromagnetic Transients in Power Transformer System Using Artificial Neural Network. In: POWER SYSTEM TECHNOLOGY, -POWERCOM, 1998. **Proceeding of IEEE**, [S.1.], ISSN 0-7803-4754-4/98, v. 2, p. 880-884, Aug. 1998.

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. **Electrical Power and Energy System, Elsevier Science Ltd.**, [S.1.], v. 22, p. 389-395, 2000.

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, NJ, v. 16, n. 4, p. 654-660, Oct. 2001.

MEGAHED, A. I.; RAMADAN, A.; ELMAHDY, W. Power Transformer Differential Relay Using Wavelet Transform Energies. In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING., 20-24 July 2008. **Proceedings...**Piscataway, NJ: IEEE 2008.

MILLER, E. K. **Smart Curve Fitting**. IEEE Potentials, [S.1.], v. 21, n. 1, p. 20-23, Feb.-Mar. 2002.

MORCHED, A.; MARTI, L.; OTTEVANGERS, J. A High-Frequency Transformer Model for the EMTP. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, 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, p. 1637-1645, 2007.

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, Nov. 2004.

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, NJ, v. 5, n. 3, p. 1299-1308, July 1990.

NAIDU, S. R. Simulation of the Hysteresis Phenomenon Using Preisach's Theory. In: PHYSICAL SCIENCE, MEASUREMENT AND INSTRUMENTATION, MANAGEMENT AND EDUCATION, 1990. **Proceedings...** [S.1.], IEE, v. 137, n. 2, p. 73-79, Mar. 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**, [S.1.], v. 4, n. 3, p. 365-371, June 2006.

NODA, T.; NAKAMOTO, H.; YOKOYAMA, S. Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformer for Electromagnetic Transient Studies. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v. 17, n. 4, p. 969-976, Oct. 2002.

OLIVEIRA, M. O.; SALIM, R. H.; BRETAS, A. S. Differential Protection of Three-Phase Transformer Using Wavelet Transform. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 2008, Colombia. **Proceedings . . .** Bogotá, Colombia, p. 198-203, Aug. 2008.

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

OU, Z. J.; HE, J. H.; BO, Z. Q.; KLIMEK, A. Power Transformer Transient Based Protection Using Wavelet De-Noising. In: IEEE PES POWER AFRICA CONFERENCE AND EXPOSITION, 2007, South Africa. **Proceedings...** New York: South Africa, July 2007.

ÖZGÖNENEL, O.; ÖNBILGIN, G.; KOCAMAN Ç. **Transformer Protection Using the Wavelet Transform**. Turk J Elec Engin -TÜBITAK, v. 13, n. 1, p. 119-135, July 2005.

ÖZGÖNENEL, O. Protection of Power Transformer By Using Continuous Wavelet Transform. In: IEEE MELECOM, 2006, Málaga, Spain. **Proceedings...** Málaga, Spain, 2006.

PEREZ, L. G.; FLECHSIG, A. J.; MEADOR, J. L.; OBRADOVIC, Z. Training an Artificial Neural Network to Discriminate Between Magnetizing Inrush and Internal Faults. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v. 9, n. 1, p. 434-441, Jan. 1994.

PEREIRA, M. P.; AMON FILHO, J. Curso Básico Sobre a Utilização do ATP. **CAUE – Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP**. [S.1.], Novembro de 1996.

POPOV, M.; VAN DER SLUIS, L. PAAP, G. C. A Simplified Transformer Model for the Simulation of Fast Surges and Adequate Protection Measures. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001. Columbus, United States. **Proceedings...** Columbus –Ohio, p. 323-328, 2001.

POVH, D. et al. Calculation of Transient Phenomena. In: ATHENS POWER TECH CONFERENCE, 1993, Athens. **Proceedings...** Athens, Greece, v. 2, p. 738-743, Sep. 1993.

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

RAHIMPOUR, E.; CHISTIAN, J.; FESER, K. Transfer Function Method to Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Windings. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v. 18, n. 2, p. 493-505, Apr. 2003.

RIES, W. **Transformadores: fundamentos para o projeto e cálculo**. Porto Alegre: EDI-PUCRS, 2007. 420 p. ISBN: 987-85-7430-645-2.

RIOUL, O.; VETTERLI, M. Wavelets and Signal Processing. **IEEE Signal Processing Magazine**, New York, NY, USA, v. 8, n. 4, p. 14-38, 1991.

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

SALEH, S. A.; RAHMAN, M. A. Real-Time Testing of a WPT-Based Protection Algorithm for Three-Phase Power Transformer. In: **INDUSTRY APPLICATION CONFERENCE, 2004**, Seattle. **Proceedings...** New York, USA: IEEE IAS, v. 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, NJ, v. 20, n. 2, p. 1273-1282, Apr. 2005.

SALIM, R. H. **Detecção de Falhas em Sistemas de Distribuição Utilizando a Transformada Wevelet**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

SEDIGHI, A. R.; HAGHIFAM, M. Detection of Inrush Current in Distribution Transformer Using Wavelet Transform. **Electrical Power and Energy System, Elsevier Science Ltd.**, [S.1.], v. 27, p. 361-370, 2005.

SHEHN, E.; KONRAD, A.; MARTI, L. Optimization Algorithm for Transformer Admittance Curves. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v. 41, n. 10, p. 4039-4041, Oct. 2005.

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, NJ, v. 7, n. 4, p. 1885-1891, Oct. 1992.

STRINGER, N. T. et al. Testing and Performance of Transformer Differential Relays. **IEEE Industry Application Magazine**, [S.1.], p. 36-42, July/Aug. 1997.

SWIFT, G. W. The Spectral of Fault-Induced Transients. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v. PAS-98, n. 3, p. 940-947, 1979.

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, USA. **Proceedings...** Chicago, USA: IEEE, p. 568-573, Sep. 2006.

TRIPATHY, M.; MAHESHWARI, R. P.; VERMA, H. K. Radial Basis Probabilistic Neural Network for Differential Protection of Power Transformer. **IET Generation, Transmission & Distribution**, United Kingdom, IET Research Journal, p. 43-52, Jan. 2008.

VAESSEN, P. T. M. Transformer Model for High Frequencies. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, 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**, Elsevier, Amsterdam, PAYS-BAS, v. 78, p. 547-558, 2008.

VÁZQUEZ, E.; MIJARES, I. I.; CHACÓN, O. L.; CONDE, A. Transformer Differential Protection Using Principal Component Analysis. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, 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, NJ, v. 16, p. 422-427, 2001.

WISZNIEWSKI, A.; KASZTENNY, B. A Multi-Criteria Differential Transformer Relay Based on Fuzzy Logic. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v. 10, n. 4, p. 1786-1792, Oct. 1995.

YACAMINI, R.; BRONZEADO, H.; Transformer Inrush Calculations Using a Coupled Electromagnetic Model. In: SCIENCE, MEASUREMENT AND TECHNOLOGY, 1994. **IEE Proceedings...** United Kingdom: IET, v. 141, n. 6, p. 491-498, Nov. 1994.

YANG, Z.; et al. A New Technique for Power Transformer Protection Using Discrete Dyadic Wavelets Transform. In: DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 2001, Amsterdam. **IEE Proceedings...** v. 479, p. 383-386, Apr. 2001.

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

YOUSSEF, O. A. S. Applications of Fuzzy-logic-wavelets-based techniques for Transformer Inrush Current Identification and Power Systems Faults Classification. In: IEEE PROCEEDING OF POWER CONFERENCE AND EXPOSITIONS, 2004. **Proceeding...**Piscataway NJ: IEEE, p. 553-559, 2004.

ZAMAN, M. A.; HOQUE, M. A.; RAHMAN, M. A. On-line Implementation of the Artificial Neural Network Based Protection for Power Transformer. In: PROCEEDING NECEC, 1996, Canadá, **Proceeding...** Piscataway, p. 5-11, 1996.

ZANETTA JR, L. C.; PEREIRA, C. E. M.; SOARES, R. M. **Desenvolvimento de Ferramenta Computacional para Estudos de Transitórios de Alta Freqüência em Transformadores**. PEA-USP: Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Carlos, 2002.

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

## ANEXO A CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO (CORRENTE *INRUSH*)

Com foi introduzido no capítulo 2 desta dissertação, a manobra de energização de um transformador gera, na bobina de operação de relé diferencial, uma corrente transitória chamada “corrente *inrush*” cujos picos de corrente podem ocasionar operações indevidas no relé de proteção. Descrevem-se a continuação as principais características dessa corrente transitória no intuito de fortalecer a explicação desenvolvida no capítulo 2 deste trabalho.

### A.1 Corrente de Magnetização nos Transformadores

Quando um transformador é energizado com seu secundário em aberto, apresenta-se sob o ramo de magnetização uma corrente transitória, que é a responsável por estabelecer o fluxo magnético no núcleo. Sendo que o transformador foi energizado em vazio, secundário em aberto, essa corrente de magnetização flui somente pelo enrolamento primário do transformador.

Segundo (EBNER, 2007) as correntes *inrush* transitórias podem exceder a corrente nominal e atingir um valor nominal próximo à corrente de curto-circuito dos transformadores de potência, após do qual a amplitude decai lentamente até chegar à corrente de magnetização de estado estável após alguns segundos. Essas correntes transitórias apresentam uma alta componente DC (corrente contínua) e são ricas em harmônicas de 1º e 2º ordem fato que afeta a qualidade de energia e pode produzir a atuação indevida do relé.

Na análise da formação da corrente *inrush*, é muito importante conhecer o que acontece no instante prévio à energização. Quando um transformador se desconecta do SEP a corrente de magnetização cai para o valor zero e, como consequência do laço de histerese, o fluxo magnético do núcleo adota um valor residual  $\Phi_R$  (MARTINEZ et al., 2005b). Durante esse período, o fluxo residual pode atingir um valor que será muito importante na seguinte energização do transformador de potência.

### A.2 Fluxo Residual ( $\Phi_R$ )

Como colocado anteriormente, o fluxo residual  $\Phi_R$  apresenta muita importância quando da energização do transformador. O valor que adota esse parâmetro quando o transformador é des-energizado, determinará a magnitude atingida pela corrente *inrush* na próxima energização.

Todo material ferromagnético após ter sido submetido à magnetização, não retorna ao seu estado original quando não está mais sujeito ao campo magnético externo. Se o

núcleo do transformador for saturado (aumentando a corrente de magnetização  $I$  até que fluxo atinja o ponto 1 da Figura 1.A) e depois o campo for removido, o fluxo magnético no núcleo do transformador  $\Phi_n$  percorrerá o caminho de volta 1-2. A ordenada do ponto 2 (0-2) é dita “fluxo magnético residual” e seu valor tem uma influência importante na geração da corrente *inrush* quando ocorre a energização do transformador.

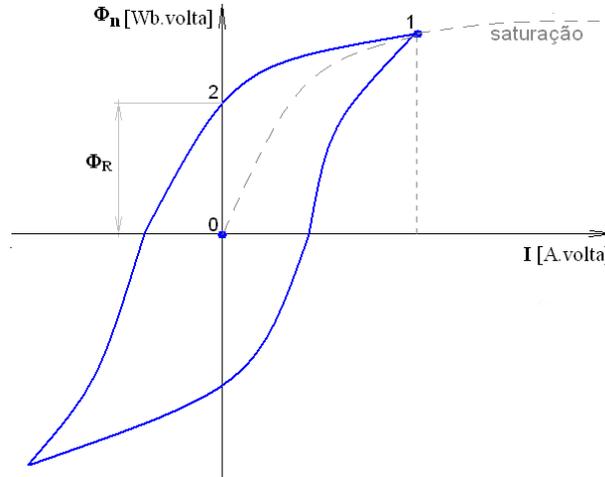


Figura 1.A: Representação esquemática do laço de histerese do núcleo de um transformador de potência.

Segundo (EBNER, 2007), considerando um transformador monofásico e desprezando-se o fluxo magnético disperso no ar, bem como a resistência das bobinas, o fluxo magnético no núcleo  $\Phi_n$  relaciona-se com a tensão na bobina  $u_b$  através da lei de indução eletromagnética (Lei de Faraday-Lenz) expressa pela seguinte equação:

$$u_b(t) = N_b \frac{d\phi_n(t)}{dt} \quad (\text{A.1})$$

Quando o transformador é des-energizado e retirado do estado permanente sem carga (estado estável), a corrente no enrolamento primário é interrompida num tempo dito  $t_0$  e o fluxo residual  $\Phi_R$  é então calculado como sendo:

$$\Phi_R = \frac{1}{N_b} \int_0^{t_0} u_b(t) \cdot dt \quad (\text{A.2})$$

sendo  $u_b(t)$ :

$$u_b(t) = U_0 \cdot \text{sen}(\omega_0 t) \quad (\text{A.3})$$

Assumindo agora um estado permanente, a equação (A.2) fica como sendo:

$$\Phi_R = -\Phi_0 \cos(\omega_0 t_0) \quad (\text{A.4})$$

Desprezando os efeitos de amortecimento dados pelas perdas no núcleo e pela resistência dos bobinados, e utilizando-se as equações (A.1) e (A.3), o fluxo magnético no primeiro período de energização pode ser calculado analiticamente através da seguinte equação (EBNER, 2007):

$$\Phi_n(t) = \frac{1}{N_b} \int_{t_f}^t u_b(t) \cdot dt + \Phi_R = \underbrace{-\Phi_0 \cos(\omega_0 t)}_{\Phi_p} + \underbrace{\Phi_0 \cos(\omega_0 t_e)}_{\Phi_r} + \Phi_R \quad (\text{A.5})$$

Se um transformador for energizado em um instante de tempo aleatório  $t_e$ , pode acontecer que apareçam ou não, correntes *inrush* transitórias, mas muito provavelmente

elas aparecerão. Isso acontece porque, segundo mostra a equação (A.5) as correntes *inrush* não dependem somente do instante de energização  $t_e$ , mas também do fluxo residual  $\Phi_R$  estabelecido no instante prévio de des-energização do transformador. O fluxo  $\Phi_T$  da equação (A.5) representa um fluxo transitório que acontece logo após o início da energização. No entanto, como consequência dos efeitos de amortecimento presentes no transformador, esse fluxo decai até o valor zero após alguns segundos, e a corrente de magnetização do estado permanente  $\Phi_P$  começa a fluir.

### A.3 Geração da Corrente *Inrush*

Como expressa a equação (A.5) o fluxo magnético no núcleo do transformador ( $\Phi_n$ ) no instante de energização é composto por um fluxo permanente ( $\Phi_P$ ) e por um fluxo transitório ( $\Phi_T$ ).

A Figura 2.A ilustra o instante de des-energização e energização junto ao comportamento dos fluxos no transformador (MARTINEZ et al., 2003). Nessa figura, mostra-se que se o transformador fosse energizado no instante  $t_e$  em que a forma de onda de tensão corresponde com a densidade magnética residual dentro do núcleo ( $\Phi_R$ ), haveria uma continuação uniforme na forma de onda da corrente de energização  $I_e$  desde a operação de des-energização em  $t_o$ , com nenhum transitório magnético acontecendo.

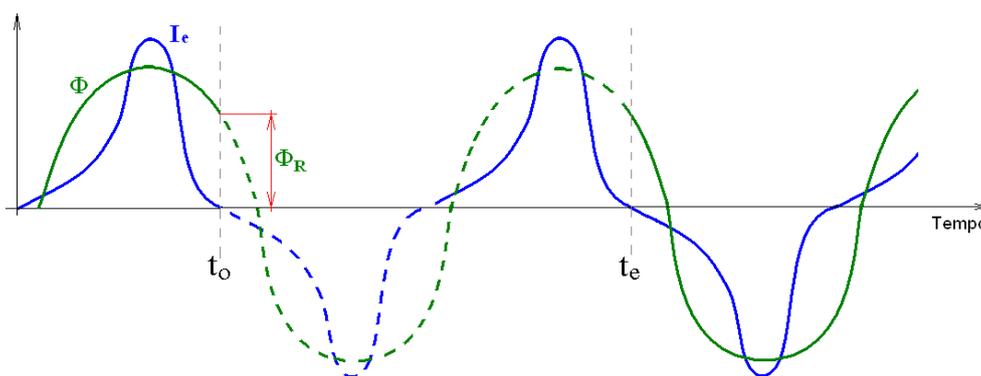


Figura 2.A: Corrente de magnetização  $I_e$  quando a energização ocorre num tempo onde a onda de tensão corresponde ao fluxo residual no núcleo.

No entanto, na prática não é possível controlar o instante de energização  $t_e$  fato que faz com que o acontecimento de um transitório eletromagnético seja inevitável. Na Figura 3.A ilustra-se a energização do transformador no instante em que o fluxo está no seu valor máximo negativo ( $-\Phi_{max}$ ) e o fluxo residual tem um valor positivo. Nessa situação, o fluxo magnético começará no valor do fluxo residual, seguindo a curva  $\Phi_i$ . Observe-se a magnitude atingida pela corrente de energização do transformador, chamada agora corrente de saturação  $I_s$ .

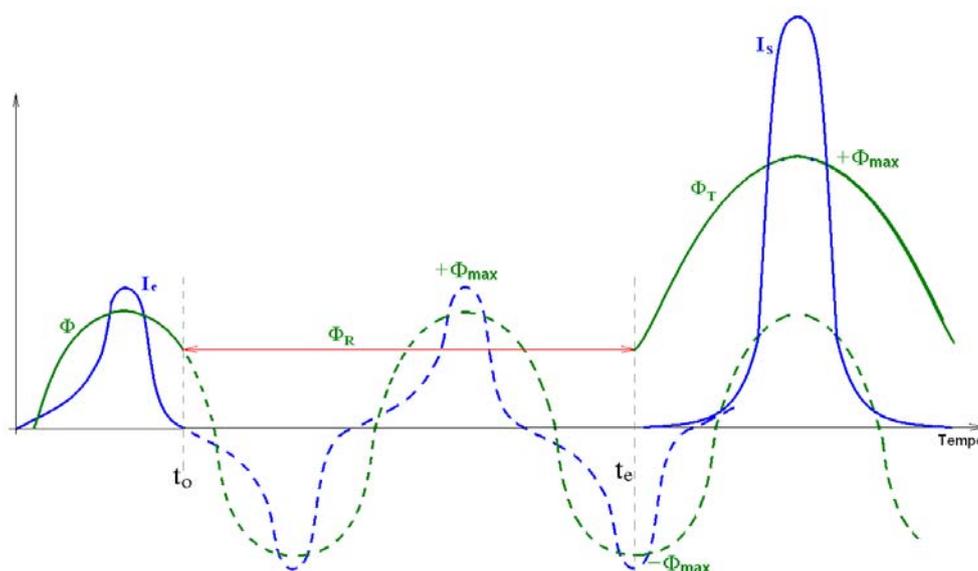


Figura 3.A: Corrente de magnetização  $I_e$  quando a energização ocorre num tempo onde o fluxo encontra-se no seu valor máximo.

Segundo (MARTINEZ et al., 2003), se considerarmos uma característica de saturação linear no transformador, a curva  $\Phi_t$  é uma função senoidal deslocada, na qual o valor de  $\Phi_{\max}$  é  $\pm |\Phi_{\max}| + 2|\Phi_{\max}|$ . Esse excesso de fluxo magnético produz um valor muito grande na corrente de magnetização, assim como mostra a figura 3.A acima.

O fluxo magnético em cada uma das três fases de um transformador trifásico apresenta uma defasagem de  $120^\circ$ , ou seja, uma fase terá um fluxo  $\Phi_R$  positivo e as outras duas um  $\Phi_R$  negativo, ou vice-versa. Como consequência, o fluxo residual poderá somar-se ou restar-se ao fluxo total, incrementando ou reduzindo a corrente de magnetização.

(MARTINEZ et al., 2003) também salienta que o tempo que a onda de corrente *inrush* fica presente no transformador depende da constante de tempo do sistema, dada pela equação seguinte:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (\text{A.6})$$

Na verdade, a constante de tempo não apresenta características de uma constante, já que o parâmetro  $L$  muda com o resultado da saturação do núcleo do transformador. Durante os primeiros segundos, a saturação é alta e  $L$  é baixa. Devido às perdas no núcleo, a saturação decai e  $L$  incrementa-se. Nesses casos, o parâmetro  $R$  mantém-se constante e representa o amortecimento do circuito.

Diante disso, os transformadores que se encontram perto de um gerador terão uma corrente de magnetização com uma larga duração devido ao fato de apresentarem um valor de resistência baixo, originado pela curta distância entre o transformador e o gerador (fonte). Do mesmo jeito, os transformadores de grande capacidade apresentaram uma tendência de ter correntes de magnetização de larga duração devido a seu alto valor de indutância relativa à resistência do sistema (MARTINEZ et al., 2003).

## ANEXO B INTRODUÇÃO A TRANSFORMADA WAVELET (TW)

Fenômenos físicos poder ser tanto de natureza estacionária quanto não-estacionária levando à utilização de duas possíveis ferramentas para estudar tais fenômenos: a Transformada de Fourier (TF) e a Transformada Wavelet (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 (CASTILHO et al., 2005). 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. Na 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 frequencial (CASTILHO et al., 2005). Algumas das aplicações da análise wavelet em SEP inclui: a análise e detecção de transitórios eletromagnéticos, qualidade de energia, compreensão de dados e detecção de faltas, entre outras (FERNANDEZ CASTRO et al., 2002).

Como foi dito, a TW é uma ferramenta eficiente para a análise de sinais não-estacionárias e de rápida transição que mapeia o sinal em uma representação tempo-frequência, da mesma forma que a Transformada de Fourier com Janelamento (WDFT). A diferença com a WDFT é que a TW pode realizar uma Análise Multi-Resolução (AMR) onde a análise de frequências altas realiza-se utilizando janelas pequenas e a análise das frequências baixas e feito utilizando janelas mais cumpridas.

Este anexo aborda uma breve introdução sobre a Transformada Wavelet, ferramenta matemática desenvolvida a mediados dos anos '80, visando justificar a sua escolha em contrapartida à técnicas clássicas de análise espectral.

### B.1 Comparação com a Transformada de Fourier

A TF é uma técnica antiga e bastante conhecida nas aplicações de processamento de sinais, processamento de imagens e inúmeras outras aplicações. A TW, por sua vez, a pesar de ter sido desenvolvida recentemente, se apresenta como a sucessora da transformada de Fourier devido tanto às vantagens operacionais quanto ao grande campo de aplicação. A TF tem por finalidade decompor uma função numa combinação linear de componentes sinusoidais com diferentes amplitudes e frequências. O conjunto de funções ortogonais,  $\{\sin(2k\pi x), \cos(2k\pi x)\}$  com  $k$  inteiro, forma a base do espaço da TF.

### B.1.1 Transformada Discreta de Fourier

A Transformada Discreta de Fourier (DFT) de uma seqüência finita de pontos corresponde à representação de uma seqüência periódica de pontos através da Série Discreta de Fourier (DFS) e é definida como (OPPENHEIN et al., 1998):

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (\text{B.1})$$

Na equação (B.1) temos que  $x[n]$  é uma seqüência de amostras retiradas de um sinal contínuo  $x(t)$  a cada  $T_s$  segundos por  $N$  amostras e representado como:

$$x[n], \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (\text{B.2})$$

A DFT produz uma seqüência de valores complexos  $X[k]$  cujas magnitudes correspondem às componentes discretas de freqüência presentes no sinal discreto  $x[n]$ . Assim, o espectro fica restrito aos valores de  $k$  entre 0 e  $N-1$ , como definido a seguir:

$$X[k] = \begin{cases} X[k] & \text{se } 0 \leq k \leq N-1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{B.3})$$

Os valores de  $x[n]$  são iguais a zero fora dos limites especificados pela equação (B.2) enquanto que os limites para os valores de  $X[k]$  ficam definidos pela equação (B.3) dado que é o espectro que realmente nos interessa (OPPENHEIN et al., 1998).

A TF é utilizada no processamento e análise de sinais quando os sinais apresentam características periódicas ou suficientemente regulares, mais não são adequadas quando sinais não-periódicas. O espectro de freqüências de um sinal utilizando a DFT é um espectro discreto, igualmente espaçado em freqüência, que corresponde ao espectro contínuo da TF do sinal. É um espectro total do sinal, do seu início até o seu fim, ou seja, a resolução temporal é muito pequena, não deixando precisão suficiente para que se identifique o instante em que certas freqüências aparecem no sinal. A base da TF é formada por um conjunto de funções senos e co-senos, que possuem valores não nulos em todo o domínio. Portanto, na TF cada componente contribui para a reconstrução da função de modo global. Desta forma, a TF determina “quais” freqüências ocorrem numa determinada função, mas não determina “onde” estas freqüências ocorrem.

Para o desenvolvimento do trabalho de pesquisa apresentado nesta dissertação foi necessário uma alta precisão na estimação do espectro de freqüências do sinal, de forma que os distúrbios eletromagnéticos (energização, faltas internas e faltas externas ao transformador) sejam detectados e possam ser avaliados, possibilitando a diferenciação do estado de falta das condições de operação. Além da precisão necessária no espectro de freqüências do sistema, a determinação do instante exato no qual a falta aconteceu exige uma boa precisão temporal. Nesse sentido, como a DFT não consegue atingir estas especificações de precisão no domínio temporal e também no domínio da freqüência ao mesmo tempo, a utilização da DFT para a detecção de faltas é desaconselhada. Sendo assim, quando do estudo de sinais transitórias e não-estacionárias a WDFT é geralmente utilizada, como se descreve a seguir.

### B.1.2 Transformada Discreta de Fourier com Janelamento

Uma das formas de analisar um sinal não-estacionário é realizar uma análise espectral dependente do tempo (SALIM, 2006). Nesse sentido, um sinal não-estacionário é dividido em uma seqüência de segmentos de tempo nos quais o sinal pode ser considerado estacionário, logo, a TF é aplicada sob cada segmento estacionário do sinal através do deslocamento da janela de análise.

A Transformada Discreta de Fourier com Janelamento (WDFT) de um sinal discreto é definida como (AGGARWAL; KIM, 2000):

$$WDFT[k, m] = \sum_n x[n] \cdot w[n - m] \cdot e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (B.4)$$

onde  $w[n-m]$  é a janela de análise, que em sua forma mais simples é uma janela retangular definido como:

$$w[n - m] = \begin{cases} 1 & \text{se } 0 \leq n - m \leq N - 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (B.5)$$

Em cada janela de análise  $w[n-m]$  a WDFT gera uma seqüência de valores complexos:

$$WDFT(k, m), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (B.6)$$

e a magnitude da WDFT representa as freqüências discretas do sinal de entrada  $x[n]$ .

A WDFT mapeia o sinal em uma representação de tempo e freqüência, exigindo um compromisso entre a visão temporal e em freqüência do sinal (princípio de incerteza de Heisenberg). Esta transformada proporciona informações temporais quando freqüências particulares estão presentes no sinal, mas a precisão desta informação é limitada, e é controlada pelo tamanho e pela forma da janela (AGGARWAL; KIM, 2000). Para conseguir uma melhor precisão temporal, a janela de análise definida segundo a equação (B.5) diminui-se. No entanto, a precisão espectral diminui, visto que o sinal efetivamente avaliado terá menos pontos.

Esta relação inversamente proporcional entre a resolução temporal e a resolução em freqüência, deve-se ao Princípio de Incerteza de Heisenberg definido pela seguinte equação (RIOUL; VETTERLI, 1991):

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (B.7)$$

A equação (B.7) implica que a resolução temporal e espectral não podem ser ao mesmo tempo pequenas. Na WDFT a resolução temporal e em freqüência são dependentes da forma e do tamanho da janela utilizada  $w[n-m]$ . Ambas as variáveis são constantes durante a análise e não é possível alterar a precisão temporal e/ou espectral da transformada. Isto faz com que não seja possível obter precisão elevada em ambas as variáveis dado o fato de que só é possível conhecer o intervalo de tempo no qual acontece uma singularidade. Assim, a análise de transitórios eletromagnéticos em SEP através deste método não é recomendada.

Nesse sentido, uma ferramenta matemática que permite resolver o problema da resolução tempo-freqüência é a TW dado que o tamanho da janela de análise é adaptado às freqüências de interesse. Uma breve descrição da TW é apresentada a seguir.

## B.2 Transformada Wavelet

A teoria Wavelets é baseada na análise de sinais utilizando escalas variáveis tanto no domínio *tempo* quanto no domínio *freqüência*. As wavelets foram desenvolvidas independentemente, por exemplo, nos campos da: Matemática, Física Quântica, Engenharia Elétrica e Geologia Sísmica. Geralmente a implementação da Transformada Wavelet (TW) faz-se através de um método denominado **codificação de sub-banda**<sup>30</sup>. Um modo de codificar um sinal discreto por sub-banda é através da filtragem digital. Basicamente, filtrar um sinal é eliminar determinadas freqüências, ou faixas de freqüências especificadas.

### B.2.1 Transformada Wavelet Contínua

Ao igual que a TF, a Transformada Wavelet é descrita em função de suas funções base, chamadas *Wavelets*, ou *Ondeletas*. No caso da TW a freqüência variável  $\omega$  é substituída por um fator de escala variável  $a$  que representa a dilatação. A variável de deslocamento no tempo  $\tau$  é representada na TW pela variável  $b$ . A grande propriedade da TW é que a mesma utiliza uma janela variável quando faz a varredura do espectro de freqüências, aumentando a resolução temporal da análise.

As wavelets são representadas por:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{B.8})$$

A constante  $1/\sqrt{a}$  utiliza-se para normalizar e garantir que a energia de  $\psi_{a,b}(t)$  seja independente do nível de dilatação da janela. As wavelets são derivadas a partir de operações de dilatação e translação da *wavelet-mãe*, definida em (B.8). Essa *wavelet-mãe* deve satisfazer o critério de admissibilidade (DAUBECHIES, 1990), dado por:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(y)|^2}{|y|} dy < \infty \quad (\text{B.9})$$

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

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (\text{B.10})$$

Assim, fica evidente que as wavelets têm uma média nula que possibilita a introdução do parâmetro de dilatação da janela.

A TW de um sinal contínuo  $x(t)$  é definida como:

$$(TWC)(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi_{a,b}(t) dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{B.11})$$

onde o fator de escala  $a$  e o fator de translação  $b$  são variáveis contínuas. A equação (B.11) mostra que o sinal unidimensional original  $x(t)$  é mapeado em uma nova função, em um espaço bidimensional, em escala  $a$  e translação  $b$ , através da TW.

<sup>30</sup> Codificação: é uma representação finita, que pode ser descrita por um conjunto finito de símbolos organizados de acordo com uma estrutura de dados. A codificação pode ser realizada sem perda ou com perda.

### Fator de Escala

O ato de mudar a escala de uma dada wavelet mãe significa o ato de dilatação ou compressão da mesma (SALIM, 2006). A Figura 1.B mostra uma exemplificação onde podemos visualizar o efeito do fator de escala  $a$  em uma função senóide. O fator de escala indica o comportamento da wavelet mãe e quanto menor  $a$  mais comprimida é a wavelet.

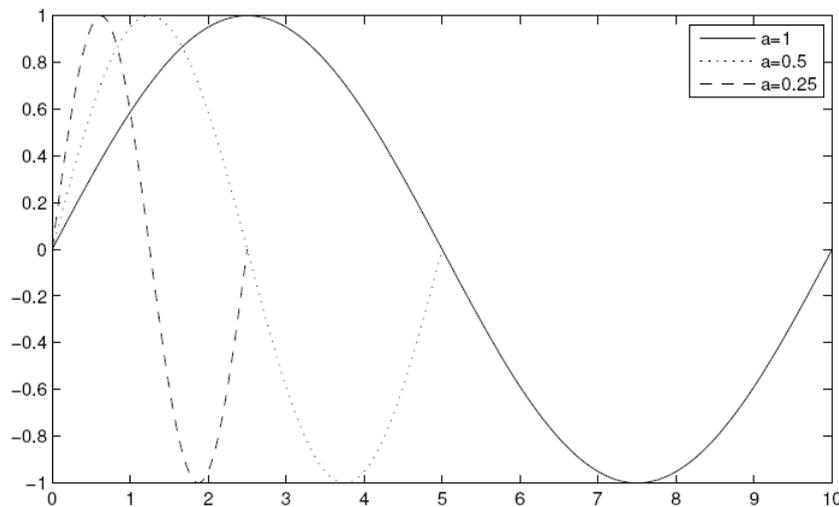


Figura 1.B: Efeito do fator de escala numa função senóide (SALIM, 2006).

Uma escala  $a$  pequena faz com que as wavelets sejam mais comprimidas e os detalhes mudem rapidamente permitindo uma análise das altas frequências do sinal. Para escalas  $a$  grandes, a wavelet é mais dilatada e os detalhes não mudam rapidamente permitindo uma análise das baixas frequências presentes no sinal.

### Fator de Translação

A translação da wavelet é o ato de deslocá-la no eixo de tempo, o que matematicamente pode ser expresso por  $x(t - t_0)$ , onde a função  $x(t)$  está atrasada em  $t_0$  segundos (SALIM, 2006).

## B.2.2 Transformada Wavelet Discreta

A TWC apresenta redundância nas informações e o cálculo das escalas e translações exige um esforço computacional maior. Esse fato restringe a utilização dessa transformada quando da detecção de distúrbios eletromagnéticos. No entanto, uma alternativa a esta análise é a discretização dos fatores de escala e translação que da origem à Transformada Wavelet Discreta (TWD). A TWD de um sinal contínuo  $x(t)$  é dada por (DINIZ, 2007):

$$(TWD) (m, p) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,p} dt \quad (B.12)$$

Na equação (B.12)  $\psi_{m,p}$  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, 2007):

$$\psi_{m,p} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi \left( \frac{t - pb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (\text{B.13})$$

A TWD de um sinal discreto  $x[n]$  pode ser expressa por (AGGARWAL; KIM, 2000):

$$(TWD)(m,k) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_n x[n] \cdot g \left( \frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (\text{B.14})$$

onde a wavelet mãe é dada como sendo:

$$g \left( \frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (\text{B.15})$$

e os parâmetros de escala  $a$  e translação  $b$  são dados são função de um parâmetro inteiro  $m$  ( $a = a_0^m$  ;  $b = nb_0 a_0^m$ ) sendo  $a_0$  e  $b_0$  constantes, dando origem às wavelet filhas.

### B.2.3 Transformada Wavelet Diádica

Por definição uma wavelet é uma onda de duração limitada, que tem um valor médio zero expresso pela equação (B.10). Portanto, ao contrário da TF onde as funções sinusoidais que se estendem desde menos infinito a mais infinito são previsíveis, as wavelets são irregulares e assimétricas (LI et al., 1998).

A Transformada Wavelet Diádica (TWDI) é uma TWD cujos parâmetros de escala  $a$  e translação  $b$  são discretizados segundo a equação seguinte:

$$a = 2^m ; \quad b = n2^m \quad (\text{B.16})$$

onde  $m, n \in \mathbb{Z}$ , o conjunto de inteiros.

Assim, temos que:

$$Wf[m,n] = \langle f, \psi_{m,n} \rangle = \int_R f(x) \psi_{m,n}(x) dx \quad (\text{B.17})$$

Onde o verdadeiro sistema wavelet fica definido como sendo:

$$\psi_{m,n}(x) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}x - n) \quad (\text{B.18})$$

O parâmetro  $n$  na equação (B.18) mostra a posição da wavelets e o parâmetro  $m$  controla a frequência. Para valores pequenos de  $m$ , a wavelets  $\psi_{m,n}$  é comprida sendo que com valores grandes de  $m$  a wavelets é dilatada. O efeito produzido pelo parâmetro  $m$  é similar ao produzido pelo fator de escala  $a$  descrito anteriormente.

### B.2.4 Energia e Potência de Sinais Discretos

A energia total de um sinal discreto  $x[n]$  é dada pela seguinte equação (HAYKIN; VENN, 2001):

$$E = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x^2[n] \quad (\text{B.19})$$

A potência média desse sinal discreto pode calcular-se como sendo (HAYKIN; VENN, 2001):

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{n=-N}^N x^2[n] \quad (\text{B.20})$$

Para um sinal periódico de período fundamental  $N$ , a potência média é dada por (HAYKIN; VENN, 2001):

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2[n] \quad (\text{B.21})$$