



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
DE COMPUTAÇÃO



# Proteção Diferencial de Transformadores de Potência Utilizando a Transformada *Wavelet*

**Rodrigo Prado de Medeiros**

Orientador: Prof. Dr. Flavio Bezerra Costa

**Dissertação de Mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Número de ordem PPgEE: M426  
Natal, RN, 26 de maio de 2014

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da publicação na fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Medeiros, Rodrigo Prado de.

Proteção Diferencial de Transformadores de Potência Utilizando a Transformada *Wavelet* / Rodrigo Prado de Medeiros - Natal, RN, 2014

109 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Flavio Bezerra Costa

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Transformadores de potência - Dissertação. 2. Proteção diferencial - Dissertação. 3. Transformada *wavelet* - Dissertação. 4. Faltas internas - Dissertação. I. Costa, Flavio Bezerra. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3

# Proteção Diferencial de Transformadores de Potência Utilizando a Transformada *Wavelet*

**Rodrigo Prado de Medeiros**

Dissertação de Mestrado aprovada em 26 de maio de 2014 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:



---

Prof. Dr. Flavio Bezerra Costa (Orientador) ..... UFRN



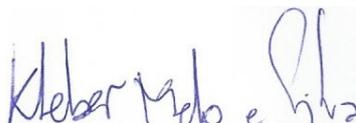
---

Prof. Dr. Alexandre Magnus Fernandes Guimarães ..... UFRN



---

Prof. Dr. Marcos Antonio Dias de Almeida ..... UFRN



---

Prof. Dr. Kleber Melo e Silva ..... UNB

*À Madinha, minha segunda mãe,  
DEDICO.*

---

# Agradecimentos

---

À Deus, o verdadeiro mestre nas nossas vidas, pelo dom da vida e pelas bênçãos e ensinamentos diários em minha vida.

Aos meus pais Sonia e Eriberto, referências de educação em minha vida, que com muito amor e apoio, nunca mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa.

A vovó Lili, Madinha, tia Celina, tia Aparecida, tios, primos e amigos, por estarem sempre ao meu lado.

A minha namorada Heloísa, pela compreensão e por ter me ajudado a acreditar na construção desse trabalho.

Ao meu orientador, professor Flavio Bezerra Costa, pela dedicada orientação e ajuda ao longo dessa jornada.

Aos amigos do Laboratório de eletrotécnica - ECT, João Campos, Denis Alves, Samara Paiva, Cicero Josean, Alyson Henrique, Emanuel Chaves, Filipe Taveiros e amigos do LEPER, Cecílio Martins, Rodrigo Barreto, Thiago de Oliveira, Rômulo Lira, Ernano Arrais e Jonas Damasceno pelo apoio na construção desse trabalho.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro durante execução do trabalho.

---

# Resumo

---

Cerca de 10% das faltas envolvendo o sistema elétrico ocorre em transformadores de potência. Portanto, a proteção aplicada aos transformadores de potência é essencial para garantir o funcionamento contínuo desse dispositivo e a eficiência do sistema elétrico. Dentre as funções de proteção aplicadas em transformadores, a proteção diferencial aparece como um dos principais esquemas, apresentando confiável discriminação entre faltas internas e faltas externas ou correntes devido à energização dos transformadores. Porém, ao utilizar as componentes de baixa frequência das correntes diferenciais que fluem pelo transformador, a principal dificuldade dos métodos de proteção diferencial convencionais consiste no atraso para detecção dos eventos. Contudo, faltas internas, faltas externas e demais distúrbios relacionados à operação do transformador apresentam transitórios, podendo ser apropriadamente detectados pela transformada *wavelet*. Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de um esquema de proteção diferencial de transformadores baseado na transformada *wavelet* para rápida detecção e identificação de faltas externas, faltas internas e condições de energização do transformador usando a energia dos coeficientes *wavelet* das correntes diferenciais. Os resultados obtidos revelam as vantagens da utilização da transformada *wavelet* na proteção diferencial em relação à proteção convencional, uma vez que ela provê confiabilidade e rapidez na detecção desses eventos.

**Palavras-chave:** Transformadores de potência, proteção diferencial, transformada *wavelet*, faltas internas.

---

# Abstract

---

About 10% of faults involving the electrical system occurs in power transformers. Therefore, the protection applied to the power transformers is essential to ensure the continuous operation of this device and the efficiency of the electrical system. Among the protection functions applied to power transformers, the differential protection appears as one of the main schemes, presenting reliable discrimination between internal faults and external faults or inrush currents. However, when using the low frequency components of the differential currents flowing through the transformer, the main difficulty of the conventional methods of differential protection is the delay for detection of the events. However, internal faults, external faults and other disturbances related to the transformer operation present transient and can be appropriately detected by the wavelet transform. In this paper is proposed the development of a wavelet-based differential protection for detection and identification of external faults to the transformer, internal faults, and transformer energizing by using the *wavelet* coefficient energy of the differential currents. The obtained results reveal the advantages of using of the wavelet transform in the differential protection compared to conventional protection, since it provides reliability and speed in detection of these events.

**Keywords:** Power transformers, differential protection, wavelet transform, internal faults.

---

# Sumário

---

<b>Sumário</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Relevância do Tema . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	3
1.3 Objetivos . . . . .	4
1.4 Contribuições . . . . .	5
1.5 Metodologia . . . . .	5
1.6 Organização do Texto . . . . .	5
<b>2 Estado da Arte</b>	<b>7</b>
2.1 Estudos e Aplicações da Transformada Wavelet na Proteção dos Sistemas Elétricos . . . . .	7
2.2 Proteção Diferencial de Transformadores de Potência . . . . .	12
2.3 Resumo . . . . .	15
<b>3 Fundamentos da Proteção Diferencial</b>	<b>17</b>
3.1 Transformadores . . . . .	17
3.2 Proteção Diferencial Convencional . . . . .	20
3.3 Proteção Diferencial Percentual com Restrição por Harmônicos . . . . .	23
3.3.1 Algoritmo de <i>Fourier</i> de um Ciclo . . . . .	24
3.3.2 Exemplo de Aplicação do Relé Diferencial Percentual com Restrição por Harmônicos . . . . .	26

3.4	Causas das Falsas Correntes Diferenciais . . . . .	30
3.4.1	Corrente de <i>Inrush</i> Durante a Energização do Transformador . . .	30
3.4.2	Sobreexcitação do Transformador . . . . .	33
3.4.3	Saturação dos TCS . . . . .	33
3.5	Resumo . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Fundamentos da Transformada <i>Wavelet</i></b>	<b>35</b>
4.1	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta Redundante (TWDR) . . . . .	35
4.1.1	Energia dos coeficientes Escala e <i>Wavelet</i> . . . . .	39
4.2	Algoritmo Recursivo para a TWDR . . . . .	40
4.2.1	Cálculo das Energias dos Coeficientes Escala e <i>Wavelet</i> . . . . .	40
4.3	Algoritmo Recursivo Para o a TWDR com Efeito de Borda . . . . .	41
4.3.1	Cálculo das Energias dos Coeficientes Escala e <i>Wavelet</i> com Efeito de Borda . . . . .	43
4.4	Resumo . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Método Proposto</b>	<b>46</b>
5.1	Projeto do Algoritmo de Proteção . . . . .	46
5.1.1	Detecção de Distúrbios . . . . .	47
5.1.2	Detecção de Falhas Internas . . . . .	52
5.2	Procedimento para Determinação da Região de Operação do Relé <i>Wavelet</i>	53
5.3	Resumo . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Resultados Obtidos</b>	<b>55</b>
6.1	Descrição do Sistema Elétrico Implementado . . . . .	55
6.1.1	Transformador de Potência . . . . .	56
6.1.2	Transformadores de Corrente . . . . .	56
6.2	Definição da Curva Característica para Proteção Diferencial Percentual com Restrição por Harmônicos . . . . .	57
6.3	Estimação da Inclinação da Curva Característica para Proteção Diferen- cial <i>Wavelet</i> . . . . .	58
6.4	Avaliação do Desempenho . . . . .	61
6.4.1	Energização do Transformador . . . . .	61
6.4.2	Faltas Externas . . . . .	62
6.4.3	Faltas Internas . . . . .	62
6.4.4	Efeito da <i>Wavelet</i> mãe . . . . .	65

6.4.5	Efeito do Ângulo de Incidência de Falta ( $\theta$ ) na Detecção de Falas Internas . . . . .	69
6.4.6	Efeito da Resistência de Falta ( $R_f$ ) na Detecção de Falas Internas . . . . .	71
6.4.7	Efeito da Variação da Percentagem de Espiras na Detecção de Falas Internas . . . . .	73
6.4.8	Remoção de Falas Externas Próximas ao Transformador de Potência . . . . .	77
6.4.9	Saturação dos TCs . . . . .	78
6.4.10	Resumo . . . . .	81
<b>7</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>82</b>
7.1	Conclusões Gerais . . . . .	82
7.2	Perspectivas de Continuação do Trabalho . . . . .	83
<b>A</b>	<b>Determinação geométrica do índice de confiabilidade C</b>	<b>90</b>
A.1	Determinação de C . . . . .	90

---

# Lista de Figuras

---

3.1	Esquema de um transformador ideal com carga. . . . .	18
3.2	Modelo saturável de um transformador monofásico. . . . .	19
3.3	Curva de saturação de um transformador. . . . .	20
3.4	Proteção diferencial percentual de transformador monofásico. . . . .	21
3.5	Característica de atuação da proteção diferencial percentual. . . . .	22
3.6	Diagrama lógico para a função diferencial com restrição de harmônicos. . . . .	24
3.7	Estimação das amplitudes dos sinais de corrente $I_{OP}$ , $I_{RT}$ , $I_2$ , $I_3$ e $I_5$ em um caso de energização do transformador. . . . .	27
3.8	Estimação das amplitudes dos sinais de corrente $I_{OP}$ , $I_{RT}$ , $I_2$ , $I_3$ e $I_5$ em um caso de falta externa ao transformador. . . . .	27
3.9	Estimação das amplitudes dos sinais de corrente $I_{OP}$ , $I_{RT}$ , $I_2$ , $I_3$ e $I_5$ em um caso de falta interna ao transformador. . . . .	28
3.10	Trajetória dos pontos de operação ( $I_{REST}$ , $I_{OP}$ ) para um caso de energização do transformador. . . . .	28
3.11	Trajetória dos pontos de operação ( $I_{REST}$ , $I_{OP}$ ) para um caso de falta externa ao transformador. . . . .	29
3.12	Trajetória dos pontos de operação ( $I_{REST}$ , $I_{OP}$ ) para um caso de falta interna ao transformador. . . . .	29
3.13	Correntes em um caso de energização de um transformador a vazio: a) Corrente secundária que flui pelo TC2; b) Corrente diferencial de operação. . . . .	32
3.14	Correntes em um caso de saturação do TC1: a) Corrente secundária que flui pelo TC1; b) Corrente secundária que flui pelo TC2; c) Corrente diferencial de operação. . . . .	34
4.1	Diagrama de blocos para dois níveis de resolução da TWDR. . . . .	36
4.2	Decomposição de um sinal de corrente com falta na primeira escala da TWDR: a) Corrente de falta; b) Coeficientes escala; c) Coeficientes <i>wavelet</i> . . . . .	37

4.3	Cálculo dos coeficientes <i>wavelet</i> em tempo real: a) Sinal original; b) Coeficientes <i>wavelet</i> do algoritmo piramidal da TWDR; c) Coeficientes <i>wavelet</i> do algoritmo piramidal da TWDR relacionados à janela deslizante do sinal (COSTA, 2014). . . . .	42
4.4	Energias calculadas para um sinal de corrente de falta. . . . .	44
5.1	Algoritmo de proteção diferencial <i>wavelet</i> proposto. . . . .	47
5.2	Energização do transformador: a) Correntes de operação e restrição; b) $\epsilon_D^{wb}$ e $\epsilon_R^{wb}$ ; c) $\epsilon_D^w$ e $\epsilon_R^w$ . . . . .	48
5.3	Falta externa: a) Correntes de operação e restrição; b) $\epsilon_D^{wb}$ e $\epsilon_R^{wb}$ ; c) $\epsilon_D^w$ e $\epsilon_R^w$ . . . . .	49
5.4	Falta interna: a) Correntes de operação e restrição; b) $\epsilon_D^{wb}$ e $\epsilon_R^{wb}$ ; c) $\epsilon_D^w$ e $\epsilon_R^w$ . . . . .	50
5.5	Definição dos limiares $E_D$ para as energias de operação: a) $\epsilon_D^{wb}$ ; b) $\epsilon_D^w$ . . . . .	52
5.6	Determinação da inclinação $K_w$ . . . . .	54
6.1	Diagrama unifilar do sistema elétrico. . . . .	55
6.2	Curva de saturação para o transformador de potência. . . . .	57
6.3	Pontos de operação para os casos de energização do transformador: a) $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$ ; b) $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$ . . . . .	59
6.4	Pontos de operação para os casos de faltas externas: a) $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$ ; b) $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$ . . . . .	59
6.5	Pontos de operação para os casos de faltas internas: a) $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$ ; b) $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$ . . . . .	60
6.6	Curvas características obtidas usando a db(4): a) Curva $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ . . . . .	60
6.7	Diagrama de caixa para o tempo de atraso na detecção de faltas internas para os algoritmos $I_{OP} = f(I_{REST})$ , $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ e $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ . . . . .	64
6.8	Efeito da <i>wavelet</i> mãe: a) $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b) $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ . . . . .	66
6.9	<i>Boxplot</i> para comparação do desempenho do algoritmo $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ para diversas <i>wavelets</i> mãe. . . . .	67
6.10	<i>Boxplot</i> para comparação do desempenho do algoritmo $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ para diversas <i>wavelets</i> mãe. . . . .	68
6.11	Efeito do Ângulo de Incidência de Falta ( $\theta$ ) na Detecção de Faltas Internas: a) $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b) $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ . . . . .	70
6.12	Pontos de operação referentes a dois casos de falta interna com ângulos de incidência $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 180^\circ$ , respectivamente. . . . .	71
6.13	Efeito da resistência de falta ( $R_f$ ) na Detecção de Faltas Internas: a) $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b) $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ . . . . .	72
6.14	Pontos de operação referentes a um caso de falta interna com $R_f = 100 \Omega$ . . . . .	73

6.15	Efeito da variação da percentagem de espiras ( $e$ ) na detecção de faltas espira-terra no transformador: a) $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b) $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ . . . . .	75
6.16	Efeito da variação dos parâmetros de falta na detecção de faltas espira- espira no transformador. a) $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b) $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ . . . . .	76
6.17	Remoção de falta externa próxima ao transformador: a) $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b) $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ . . . . .	77
6.18	Falta externa com e sem o efeito de saturação nos TCs. . . . .	79
6.19	Saturação de TC devido à ocorrência de falta externa: a) $\epsilon_D^{wb}$ e $\epsilon_R^{wb}$ ; b) $\epsilon_D^w$ e $\epsilon_R^w$ . . . . .	80
6.20	Saturação de TC devido à ocorrência de falta externa. a) $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b) $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ . . . . .	80
A.1	Determinação geométrica do índice de confiabilidade. . . . .	90

---

# Lista de Tabelas

---

1.1	Probabilidade de ocorrência de falhas em alguns componentes do sistema elétrico (PAITHANKAR; BHIDE, 2004). . . . .	2
1.2	Desligamentos forçados em transformadores em 2011 (TAVARES, 2013). . . . .	4
2.1	Resumo da revisão bibliográfica referente aos métodos <i>wavelets</i> empregados na proteção de sistemas elétricos e na qualidade de energia. . . . .	16
3.1	Distúrbios em transformadores e suas respectivas componentes harmônicas mais predominantes. . . . .	23
6.1	Parâmetros utilizados na modelagem do transformador de potência. . . . .	56
6.2	Base de dados para obtenção da curva do método <i>wavelet</i> proposto. . . . .	58
6.3	Desempenho dos algoritmos $I_{OP} = f(I_{REST})$ , $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ e $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ , perante energização do transformador. . . . .	62
6.4	Desempenho dos algoritmos $I_{OP} = f(I_{REST})$ , $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ e $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ , perante faltas externas. . . . .	62
6.5	Desempenho dos algoritmos $I_{OP} = f(I_{REST})$ , $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ e $\epsilon_{iD}^w = f(\epsilon_R^w)$ na detecção de faltas internas. . . . .	62
6.6	Faltas internas com transitórios amortecidos. . . . .	63
6.7	Desempenho dos algoritmos $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ e $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ para detecção de faltas internas usando diferentes <i>wavelets</i> mãe. . . . .	66
6.8	Desempenho dos algoritmos $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ e $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ para detecção do instante inicial de faltas internas usando diferentes <i>wavelets</i> mãe. . . . .	68
6.9	Variação do parâmetro $\theta$ . . . . .	69
6.10	Desempenho dos algoritmos $I_{OP} = f(I_{REST})$ , $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ e $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ na detecção de faltas internas com variação de $\theta$ . . . . .	71
6.11	Variação do parâmetro $R_f$ . . . . .	72
6.12	Desempenho dos algoritmos $I_{OP} = f(I_{REST})$ , $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ e $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ na detecção de faltas internas com variação de $R_f$ . . . . .	73
6.13	Variação do parâmetro $\Delta e$ para faltas espira-terra no transformador. . . . .	74

6.14	Desempenho dos algoritmos $I_{OP} = f(I_{REST})$ , $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ e $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ na detecção de faltas espira-terra no transformador. . . . .	74
6.15	Variação dos parâmetros de falta para faltas espira-espira no transformador.	75
6.16	Desempenho dos algoritmos $I_{OP} = f(I_{REST})$ , $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ e $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ na detecção de faltas espira-espira no transformador. . . . .	76
6.17	Variação do parâmetro $t_{op}$ para os casos de remoção de faltas externas. . .	77
6.18	Desempenho dos algoritmos $I_{OP} = f(I_{REST})$ , $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ e $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ , quanto à não-operação do esquema de proteção perante a remoção de faltas externas. . . . .	78
6.19	Resumo do desempenho dos métodos discutidos nessa dissertação. . . . .	81

---

# Lista de Símbolos

---

$A_0$	Amplitude da componente DC de um sinal
$A_h$	Amplitude do fasor de ordem harmônica $h$ de um sinal
$\tilde{A}_1$	Matriz dos coeficientes escala da TWDR
$\tilde{B}_1$	Matriz dos coeficientes <i>wavelet</i> da TWDR
$C$	Índice de confiabilidade para faltas internas
$d_f$	Distância de falta
$\Delta_k$	Número de amostras do sinal original em um ciclo
$\dot{\epsilon}$	Energia dos coeficientes <i>wavelet</i>
$\ddot{\epsilon}$	Energia dos coeficientes escala
$\epsilon^{wb}$	Parcela da energia dos coeficientes <i>wavelet</i> calculada sem a inclusão dos coeficientes <i>wavelet</i> com borda
$\epsilon^{wa}$	Parcela da energia dos coeficientes <i>wavelet</i> calculada com a inclusão dos coeficientes <i>wavelet</i> com borda
$\epsilon^w$	Energia dos coeficientes <i>wavelet</i>
$\epsilon_D^{wb}$	Energia dos coeficientes <i>wavelet</i> sem bordas da corrente de operação
$\epsilon_D^w$	Energia dos coeficientes <i>wavelet</i> com bordas da corrente de operação
$\epsilon_R^{wb}$	Energia dos coeficientes <i>wavelet</i> sem bordas da corrente de restrição
$\epsilon_R^w$	Energia dos coeficientes <i>wavelet</i> com bordas da corrente de restrição
$\epsilon_R$	Energia dos coeficientes <i>wavelet</i> da corrente de restrição
$E_D$	Limiar para as energias dos coeficientes <i>wavelet</i> da corrente de operação
$E_R$	Limiar para as energias dos coeficientes <i>wavelet</i> da corrente de restrição
$e_1$	Força contra-eletromotriz induzida no primário do transformador
$e_2$	Força eletromotriz induzida no secundário do transformador
$f$	Frequência fundamental do sistema, 60 Hz
$f_c$	Frequência de corte do filtro anti-aliasing
$f_s$	Frequência de amostragem
$\tilde{g}$	Coefficientes do filtro escala da transformada <i>wavelet</i> discreta redundante

$\tilde{h}$	Coeficientes do filtro <i>wavelet</i> da transformada <i>wavelet</i> discreta redundante
$h_c$	Filtro de <i>Fourier</i> relacionado à parte real do fasor
$h_s$	Filtro de <i>Fourier</i> relacionado à parte imaginária do fasor
$i_0$	Corrente de excitação
$i_{P1}, i_{P2}$	Correntes primárias dos transformadores de corrente
$i_{S1}, i_{S2}$	Correntes secundárias dos transformadores de corrente
$i_D$	Corrente de operação do relé diferencial percentual
$i_R$	Corrente de restrição do relé diferencial percentual
$I_{PU}$	Corrente mínima de atuação <i>pickup</i> do relé diferencial
$I_h$	Componente harmônica de ordem $x$ da corrente de operação
$I_{OP}$	Componente fundamental da corrente de operação do relé diferencial percentual com restrição por harmônicos
$I_{REST}$	Corrente de restrição adicional
$I_{RT}$	Componente fundamental da corrente de restrição do relé diferencial percentual com restrição por harmônicos
$k$	índice da amostra
$K_h$	Constante para cada componente harmônica $k$
$k_f$	Primeira amostra com falta
$k_s$	Primeira amostra com saturação do TC
$k_t$	Número de amostras de um sinal
$K$	Constante de inclinação do relé diferencial percentual
$K_w$	Constante de inclinação do esquema de proteção <i>wavelet</i>
$L$	Número de coeficientes dos filtros escala e <i>wavelet</i>
$L_m$	Indutância do ramo magnetizante do modelo do transformador
$L_1, L_2$	Indutâncias dos enrolamentos primário e secundário do transformador de potência, respectivamente
$n_1, n_2$	Quantidade de espiras no secundário dos transformadores de corrente
$N_1, N_2$	Quantidade de espiras no primário e no secundário do transformador, respectivamente
$P_m$	Perdas no núcleo do transformador
$\phi, \phi_0$	Fluxo no núcleo do transformador e fluxo residual, respectivamente
$\phi_m$	Fluxo de pico
$\Phi_n$	Fase do fasor da $n$ -ésima harmônica de um sinal
$r_f$	Resistência de falta
$R_m$	Resistência de magnetização do transformador

$R_1, R_2$	Resistências dos enrolamentos primário e secundário do transformador de potência, respectivamente
$S$	Potência nominal do transformador
$s_j$	Coefficiente escala no nível de resolução $j$
$s_1$	Coefficiente escala no primeiro nível de resolução
$s_2$	Coefficiente escala no segundo nível de resolução
$\tilde{s}$	Coefficientes escala com bordas
$\theta$	Ângulo da fase A da onda de tensão
$T$	Período fundamental do sinal
$t_k$	Tempo de amostragem dos sinais
$t_w$	Tempo gasto para o cálculo de um coeficiente <i>wavelet</i> ou escala
$v_1$	Tensão variável aplicada ao primário do transformador
$v_2$	Tensão induzida no secundário do transformador
$V_{1m}$	Valor de pico da tensão induzida no primário do transformador
$w$	Frequência angular
$w_j$	Coefficientes <i>wavelet</i> no nível de resolução $j$
$w_1$	Coefficientes <i>wavelet</i> no primeiro nível de resolução
$w_2$	Coefficientes <i>wavelet</i> no segundo nível de resolução
$\tilde{w}$	Coefficientes <i>wavelet</i> com bordas
$x(t)$	Sinal arbitrário no domínio do tempo contínuo
$Y_{ch}$	Componente real da $n$ -ésima harmônica do sinal
$Y_{sh}$	Componente imaginária da $n$ -ésima harmônica do sinal

---

# Lista de Abreviaturas e Siglas

---

AM	Análise Multiresolução
AT	Falta envolvendo a fase A e a terra
AB	Falta envolvendo as fases A e B
AC	Falta envolvendo as fases A e C
ABT	Falta envolvendo as fases A e B e a terra
ACT	Falta envolvendo as fases A e C e a terra
ABC	Falta envolvendo as fases A, B e C
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
BT	Falta envolvendo a fase B e a terra
BC	Falta envolvendo as fases B e C
BCT	Falta envolvendo as fases B e C e a terra
CT	Falta envolvendo a fase C e a terra
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
FLS	<i>Fuzzy Logical System</i>
FMM	Força magnetomotriz
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
RNAs	Redes Neurais Artificiais
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
TCs	Transformadores de Corrente
TFD	Transformada de Fourier Discreta
TPCs	Transformadores de Potencial Capacitivos
TWC	Transformada <i>Wavelet</i> Contínua
TWD	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta
TWDR	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta Redundante
TWP	Transformada <i>Wavelet Packet</i>

---

# Capítulo 1

## Introdução

---

### 1.1 Relevância do Tema

Um sistema elétrico de potência típico é dividido em três subsistemas: geração, transmissão e distribuição. O subsistema de geração é responsável pela geração da energia elétrica por meio da utilização de diferentes formas de energias primitivas, tais como: energia das águas, dos ventos e do sol. O sistema de transmissão é responsável por interconectar as grandes usinas de geração às regiões de grande consumo, enquanto que a rede de distribuição é responsável pelo fornecimento de energia elétrica aos consumidores industriais de médio e pequeno porte, consumidores comerciais e de serviços e consumidores residenciais.

No sistema elétrico de potência, os transformadores são dispositivos destinados à compatibilização dos níveis de tensões e correntes em seus terminais primário e secundário, tornando possível a conexão dos geradores e das cargas aos sistemas de transmissão e de distribuição.

Da mesma forma que os demais componentes do sistema elétrico, transformadores estão sujeitos às faltas. Portanto, esses dispositivos necessitam de monitoramento contínuo e proteção rápida, uma vez que são caros e essenciais para o funcionamento dos sistemas elétricos (BARBOSA et al., 2011a). Na Tabela 1.1 apresenta-se a probabilidade de ocorrência de falhas para os mais diversos equipamentos do sistema elétrico (PAITHANKAR; BHIDE, 2004).

De acordo com a Tabela 1.1 e segundo Blackburn e Domin (2006), cerca de 10% das faltas nos sistemas elétricos de potência ocorrem em transformadores de potência, sendo 70% destas faltas causadas por curto-circuitos em seus enrolamentos. Faltas em transformadores causam prejuízos, principalmente, devido ao custo da energia não entregue por causa da sua indisponibilidade, multas e possíveis custos adicionais de reparo de danos de equipamentos (PAITHANKAR; BHIDE, 2004). Além disso, faltas em transformado-

Tabela 1.1: Probabilidade de ocorrência de falhas em alguns componentes do sistema elétrico (PAITHANKAR; BHIDE, 2004).

Componente	Probabilidade de falha (%)
Linhas de transmissão	50,0
Disjuntores	12,0
TCS, equipamentos de controle, etc.	12,0
Transformadores	10,0
Cabos subterrâneos	9,0
Geradores	7,0
Total	100,0

res são consideradas, muitas vezes, distúrbios mais severos para a rede de transmissão que as faltas em linhas de transmissão, as quais geralmente podem ser reparadas rapidamente (ABB, 1999). Portanto, a proteção dos transformadores de potência é necessária e indispensável.

Entre as funções de proteção aplicadas em transformadores, a função diferencial tem sido largamente utilizada como proteção primária para transformadores com potência nominal superior a 10 MVA (IEEE Std C37.91-2008, 2008), apresentando confiável discriminação entre faltas internas e faltas externas ou condições de carregamento nominal do sistema. Relés numéricos modernos incorporaram as funções da proteção diferencial, mostrando-se mais rápidos, seguros e confiáveis que os antigos relés eletromecânicos e estáticos (BLACKBURN; DOMIN, 2006).

Normalmente, relés diferenciais comparam as correntes que fluem pelos terminais do transformador protegido, de modo que em uma condição de falta interna, o equipamento seja desconectado do sistema elétrico. Contudo, algumas condições operacionais, como manobras de energização e o consequente aparecimento das correntes de *inrush* podem causar correntes diferenciais significativas. Com a finalidade de evitar uma incorreta operação do relé, nesse caso, é necessário a correta discriminação entre a corrente de *inrush* e a corrente de falta (BARBOSA et al., 2011a).

Na literatura, os métodos de proteção diferencial baseados na restrição de componentes harmônicas têm sido bastante utilizados para resolver este problema. Essa abordagem é baseada no fato de que cada fenômeno possui um espectro harmônico característico. Por exemplo, na energização do transformador, a componente de segunda harmônica da corrente é maior que em uma corrente de falta típica (ELMORE, 2003). Porém, essa metodologia pode apresentar um atraso na detecção de faltas devido ao tempo de convergência na estimação dos fasores na transição do regime permanente para o regime de falta.

Nos últimos anos, técnicas modernas de processamento digital de sinais e inteligência artificial, tais como redes neurais artificiais (RNAs), lógica *fuzzy* e transformada *wavelet* têm sido propostas para detectar e classificar faltas e alguns distúrbios de qualidade da energia (KHAN; OZGONENEL; RAHMAN, 2007; VAZQUEZ et al., 2008; COSTA; SOUZA; BRITO, 2010; BARBOSA et al., 2011a; SHAH; BHALJA, 2013). Dentre esses algoritmos, a transformada *wavelet* apresenta um elevado potencial como ferramenta matemática auxiliar aos estudos de proteção, pois vem apresentando resultados satisfatórios na detecção, localização e classificação de faltas nos sistemas elétricos de potência, podendo também ser aplicada à proteção diferencial (OLIVEIRA; BRETAS, 2009; GA-OUUDA; SALAMA, 2010; SALEH; SCAPLEN; RAHMAN, 2011).

Apesar da transformada *wavelet* apresentar um bom desempenho para detecção de faltas no sistema elétrico, esta apresenta algumas limitações para aplicações práticas na proteção de sistemas elétricos, tais como: falha na detecção de faltas com transitórios superamortecidos, forte influência da *wavelet* mãe e atraso no tempo para algumas *wavelets* mãe em análises em tempo real (COSTA, 2014). Para superar essas limitações, Costa (2014) propôs a utilização da transformada *wavelet* com efeitos de bordas para detecção em tempo real dos transitórios de falta.

Propõe-se nessa dissertação a utilização da transformada *wavelet* convencional e com efeito de bordas na proteção diferencial de transformadores, de modo a discriminar corretamente uma condição de falta interna de faltas externas e condições de energização do transformador, com desempenho equivalente aos métodos convencionais, porém, com tempo de detecção superior.

## 1.2 Motivação

A qualidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores são fatores importantes na avaliação da eficiência de um sistema elétrico de potência. Nos últimos anos, a ocorrência de apagões no sistema elétrico brasileiro, por exemplo, tem trazido grandes prejuízos à sociedade. Com relação aos transformadores, de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2011, ocorreram 1194 desligamentos forçados desses dispositivos conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), considerando os níveis de tensão de 138, 230, 345, 440, 500 e 750 kV. O número de desligamentos de transformadores por nível de tensão e a sua duração média, em horas, são listados na Tabela 1.2 (TAVARES, 2013).

Nesse contexto, há uma grande necessidade e interesse de muitas companhias elétricas no desenvolvimento de metodologias de proteção que venham a ser aplicáveis aos

Tabela 1.2: Desligamentos forçados em transformadores em 2011 (TAVARES, 2013).

Nível de tensão (kV)	Desligamentos	Duração média(h)
750	4	3,2
500	101	5,9
440	42	2,6
345	94	31,3
230	407	5,7
138	546	12,1

equipamentos do sistema elétrico, como por exemplo os transformadores, para rápida detecção e eliminação das faltas. Essa tarefa representa um desafio para os engenheiros de proteção e pesquisadores, contribuindo como fonte de motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

### 1.3 Objetivos

O objetivo geral da dissertação de mestrado é o desenvolvimento de um algoritmo de proteção diferencial de transformadores de potência baseado nas energias dos coeficientes *wavelet*, que permita a rápida detecção e a correta distinção das faltas internas de correntes de *inrush* e eventos externos ao transformador.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolvimento de um algoritmo de proteção diferencial baseado na transformada *wavelet*, que não apresente as deficiências de outros métodos *wavelets* atuais, tais como: dependência da *wavelet* mãe, atrasos no tempo devido ao processo de filtragem e limitações na análise de faltas com transitórios amortecidas.
- Avaliar o comportamento das energias dos coeficientes *wavelet* frente às faltas internas, externas e correntes de *inrush*.
- Implementar a proteção diferencial baseada nos algoritmos *wavelet* convencional e *wavelet* com bordas, segundo a filosofia clássica da proteção diferencial convencional.
- Avaliar o desempenho do esquema de proteção proposto com simulações no ATP (*Alternative Transients Program*).
- Comparar o desempenho do esquema de proteção *wavelet* proposto com a proteção diferencial convencional.
- Implementar um algoritmo recursivo para o cálculo das energias dos coeficientes *wavelet*, que possa ser utilizado em aplicações em tempo real.

## 1.4 Contribuições

A principal contribuição consiste na proposição de um novo algoritmo de proteção diferencial de transformadores, baseado nas *wavelets*, com desempenho equivalente aos relés diferenciais convencionais, porém, com tempo de detecção de faltas internas muito superior.

Com relação às publicações, um artigo com o título "*Differential Protection of Power Transformers Using The Wavelet Transform*" foi aceito para publicação no *IEEE General Meeting 2014*.

## 1.5 Metodologia

Este trabalho foi realizado conforme a seguinte metodologia:

- Revisão bibliográfica dos trabalhos mais relevantes na utilização da proteção diferencial em transformadores e na aplicação da transformada *wavelet* em sistemas elétricos de potência, de modo a se definir o estado da arte referente ao tema do trabalho.
- Estudo da fundamentação teórica da proteção diferencial de transformadores de potência, dos métodos convencionais baseados nos algoritmos de *Fourier* e da transformada *wavelet*, em suas versões discreta (TWD) e discreta redundante (TWDR).
- Simulação e análise extensiva das oscilografias obtidas dos distúrbios associados ao transformador (energização do transformador, falta externa e falta interna), em um sistema elétrico modelado no ATP.
- Desenvolvimento da metodologia de proteção diferencial baseada nas *wavelets* em ambiente Matlab e comparação da metodologia de proteção proposta com o algoritmo convencional baseado no princípio de restrição por harmônicos.
- Avaliação dos resultados obtidos.

## 1.6 Organização do Texto

A dissertação está organizada da seguinte maneira:

1. No capítulo 2 é apresentado um levantamento do estado da arte sobre as técnicas de proteção diferencial de transformadores de potência, bem como a utilização da transformada *wavelet* na proteção dos sistemas elétricos.

2. No capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica do esquema de proteção diferencial convencional, com ênfase na descrição das características de funcionamento do relé diferencial percentual.
3. No capítulo 4 é realizado o estudo e fundamentação da transformada *wavelet*, mostrando algumas vantagens da utilização TWDR em relação à TWD na análise dos distúrbios transitórios nos transformadores. É apresentada também a teoria da TWDR com bordas, tal como em Costa (2014).
4. No capítulo 5 é apresentada a metodologia empregada no projeto do relé de proteção diferencial proposto neste trabalho.
5. No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos de acordo com os testes de simulação da metodologia de proteção proposta.
6. No capítulo 7 são apresentadas as considerações finais e as propostas para a continuidade dessa pesquisa.

---

# Capítulo 2

## Estado da Arte

---

A transformada *wavelet* tem sido bastante empregada na análise de distúrbios de qualidade de energia elétrica e na proteção de sistemas elétricos, incluindo a proteção de transformadores de potência. Nesse capítulo será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre: 1) a utilização das *wavelets* nos sistemas elétricos de potência; 2) metodologias que vêm sendo empregadas na proteção de transformadores, desde as técnicas convencionais às técnicas mais discutidas na atualidade.

### 2.1 Estudos e Aplicações da Transformada Wavelet na Proteção dos Sistemas Elétricos

Soluções para detecção, classificação e localização de faltas nos sistemas elétricos de potência têm sido largamente propostas por meio da transformada *wavelet*, que tem assumido uma posição de destaque nos estudos atuais nessa área, uma vez que permite uma melhor localização no tempo de componentes de frequência. Por exemplo, os sinais de falta contêm uma componente fundamental, harmônicas, componentes de alta e baixa frequência (transitórios) e uma componente DC com decaimento exponencial, o que torna a transformada *wavelet* um ótimo candidato para a análise de tais sinais não estacionários.

Megahed, Moussa e Bayoumy (2006) propuseram um novo método para a detecção de faltas em linhas de transmissão com compensação série a partir da TWD. O método é baseado na detecção de bandas de frequências distintas contidas no sinal da corrente de falta. Durante uma falta no sistema de potência, o comportamento não linear de um arranjo de capacitores série, as características de rápida mudança de impedância do circuito e o transitório gerado a partir dos dispositivos de proteção não lineares dos capacitores de compensação podem afetar a qualidade dos sinais de tensão e corrente, e, portanto, criar problemas com a funcionalidade do relé. Por meio da TWD, o espectro de frequências do

sinal original é dividido em duas bandas de frequências e as energias de cada banda são calculadas, levando-se em consideração o efeito do barramento capacitivo, em série com a linha de transmissão. Para a detecção da falta utilizou-se uma *wavelet* mãe da família *Daubechies*, com quatro coeficientes, definida nesta dissertação como  $db(4)$ <sup>1</sup>. As energias dos coeficientes *wavelet* no primeiro e sexto nível de resolução foram calculadas. Após a detecção, a classificação da falta é feita calculando o valor médio dos coeficientes *wavelet* da menor banda de frequência para as três correntes de fase e a corrente de neutro. Para a classificação, utilizou-se como *wavelet* mãe a *Haar*<sup>2</sup>, com apenas dois coeficientes. Os dados foram amostrados a uma taxa de 200 kHz. A técnica proposta apresentou uma precisão bastante elevada na detecção das faltas e na identificação da zona faltosa. O algoritmo mostrou robustez e não respondeu às operações de chaveamento. Porém, a utilização de várias escalas, várias *wavelets* mãe e a elevada taxa de amostragem podem inviabilizar aplicações práticas e que exijam processamento em tempo real.

Em Pradhan et al. (2004), a classificação da falta em uma linha de transmissão com compensação série foi realizada utilizando sistemas de lógica fuzzy (FLS), os quais consideram os coeficientes *wavelet* das correntes como entradas. A abordagem utiliza as informações obtidas a partir da decomposição *wavelet* das correntes para a seleção da fase defeituosa e identificação da seção. A *wavelet* mãe utilizada é a *Meyer*<sup>3</sup>. Os valores máximos dos coeficientes *wavelets* em três níveis são alimentados a um FLS, concebido para a classificação da falta. Após a classificação da falta, um outro dispositivo FLS é concebido para realizar a identificação da seção da falta. Os resultados das simulações indicaram que a integração entre transformada *wavelet* e a lógica *fuzzy* classificou com sucesso faltas fase-terra. Esta nova abordagem foi testada para diferentes tipos de faltas em várias situações e locais no sistema de transmissão. O funcionamento do capacitor série de desvio e a presença de caminhos paralelos no sistema não são estudados neste trabalho.

Osman e Malik (2004) comentaram sobre as vantagens da utilização da transformada *wavelet* em relação às técnicas convencionais de Fourier na proteção de distância de linhas de transmissão, revelando melhores resultados na presença das componentes de alta frequência e da componente DC, ambas presentes nos sinais de falta. O algoritmo realiza duas decomposições: a primeira utiliza a *wavelet* mãe *Haar* para detectar os distúrbios na linha e a segunda utiliza a  $db(4)$  para estimar os fasores na frequência fundamental dos sinais de corrente e tensão, e realizar o cálculo das impedâncias de falta. A frequência de

---

<sup>1</sup> $db(L)$  - *wavelet* mãe da família *Daubechies* com  $L$  coeficientes;

<sup>2</sup>*Haar* - *wavelet* mãe equivalente a  $db(2)$

<sup>3</sup>*Meyer* - família de *wavelet* mãe

amostragem utilizada foi de 960 Hz e os testes foram feitos com dados simulados e dados reais. O sistema proposto conseguiu identificar com sucesso todos os eventos de falta em menos de um ciclo após o início da falta.

Chen et al. (2003) propõem um novo esquema de proteção direcional em linhas de transmissão baseado na transformada *wavelet*, no qual o sinal das ondas viajantes é dividido em várias escalas, e o módulo máximo dos coeficientes *wavelet* do sinal em cada escala é analisado, o que permite distinguir a ocorrência de transitórios do sinal original. Com a eliminação do ruído, o módulo máximo dos coeficientes *wavelets* pode ser aplicado e utilizado para identificar a direção das ondas viajantes. Para processar o sinal com ondas viajantes com componentes de frequência entre 10 e 100 kHz, a taxa de amostragem do microprocessador do sistema de proteção escolhida foi de 100 kHz. As três primeiras escalas foram utilizadas para a análise. O esquema proposto superou muitos problemas que a proteção baseada em ondas viajantes enfrenta, como o efeito dos transformadores de potencial capacitivos (TPCs) e a influência da resistência de falta. Porém, como desvantagem, faltas cujo ângulo de inserção é aproximadamente zero não puderam ser avaliadas neste método.

Um dos grandes problemas na proteção de transformadores de potência é o correto funcionamento dos relés de proteção frente aos diversos distúrbios que ocorrem no sistema elétrico, fato que motivou o trabalho de Gomez-Morante e Nicoletti (1999), cuja proposta foi apresentar um método baseado nas *wavelets*, o qual precisaria a discriminação entre faltas internas e correntes de energização de transformadores. O esquema proposto é baseado na análise da energia dos sinais em blocos tempo-frequência. A frequência de amostragem utilizada foi 40,96 kHz e os sinais foram decompostos em vários níveis (frequências). Bons resultados a partir deste método foram obtidos, uma vez que informações da distribuição de energia dos diferentes sinais em uma escala tempo-frequência foram observadas, diferentemente do que se esperava com a análise tradicional de Fourier.

A transformada *wavelet* existe em suas versões contínua (TWC), discreta (TWD) e "Packet" (TWP). Saleh e Rahman (2005) propõem um novo algoritmo baseado na TWP para o diagnóstico correto entre correntes de magnetização e faltas internas em transformadores de potência trifásicos. A seleção da *wavelet* mãe e definição do número de níveis de resolução ideal são realizados por meio do critério MDL (*Minimum Description Length*). O algoritmo proposto foi testado e comparado com o método tradicional de restrição de harmônicos. Os resultados das simulações mostraram rapidez, precisão e confiabilidade do algoritmo TWP na identificação das diferentes correntes que fluem em um transformador de potência em várias condições de operação.

Em Bhalja e Maheshwari (2008), o problema da proteção de linhas de transmissão

com multi-terminais é estudado por meio da utilização da transformada *wavelet*. Neste método *wavelet*, os sinais de corrente são decompostos até a terceira escala e, em seguida, os coeficientes de aproximação deste nível são reconstruídos e utilizados para obtenção dos sinais de operação e restrição. O método proposto foi testado extensivamente por meio do *software* PSCAD/EMTDC com dados de falta, gerados a partir do modelo de uma linha de transmissão de 400 kV. Os resultados de simulação indicaram que o esquema proposto apresentou sensibilidade para a proteção da linha, bem como segurança e estabilidade para casos de faltas externa à sua zona de proteção. Comparado com a metodologia vista em Al-Fakhri (2004), o esquema proposto apresentou estabilidade nos casos de alimentação externa e confiabilidade na detecção de faltas de alta impedância e internas à zona de proteção.

O problema de estudo de faltas em sistemas de potência não apenas contempla os transformadores e as linhas de transmissão. Khan, Ozgonenel e Rahman (2007) propõem o desenvolvimento e implementação de um esquema de proteção baseado nas *wavelets*, em tempo real, para o diagnóstico de falhas estatóricas em geradores síncronos. Apresentaram-se diferentes casos de faltas em enrolamentos estatóricos em motores síncronos, tais como: faltas externas, faltas espira-a-espira, desbalanceamento das fases estatóricas e situações de condição normal de funcionamento. Os dados coletados dessas diferentes condições são decompostos até o segundo nível de resolução da TWP usando como *wavelet* mãe a db(8). Neste trabalho, a quantidade de potência instantânea baseada na *wavelet* ortogonal é definida usando os valores instantâneos de segundo nível dos coeficientes de tensões e correntes da TWP. O critério para a detecção baseia-se na comparação da potência obtida a partir das amostras de tensão e corrente adquiridas nos terminais do gerador. A técnica de proteção incorporando a detecção baseada em energia *wavelet* é testada online com êxito para um gerador síncrono de laboratório de 1,6 kW usando um *DSP* ds1102. Além disso, é validada tanto por meio de simulação, como experimentalmente. O desempenho do sistema de proteção proposto melhorou quando comparado com o sistema de proteção baseado no algoritmo da transformada de Fourier discreta (TFD), requerendo uma menor memória computacional para a implementação online, além de apresentar facilidade de implementação e rapidez.

Eissa (2012) propõe uma técnica baseada na transformada *wavelet* para correta distinção de faltas internas à zona de proteção de um barramento de faltas externas à zona, particularmente nos casos em que ocorre saturação nos transformadores de corrente. A função base utilizada foi a chapéu mexicana (Hat Mexican), que foi considerada por ser uma excelente discriminante dos sinais de falta durante a saturação dos TCs. O método apresentou sucesso na discriminação de faltas durante a saturação dos TCs, erros na re-

lação de transformação dos TCs, saturação dos TCs precoce e diferentes condições de faltas.

Além das faltas, outros distúrbios presentes no sistema elétrico são também estudados por meio da transformada *wavelet*. Costa e Driesen (2013) apresentam uma abordagem baseada na metodologia *wavelet* para a caracterização de afundamentos de tensão, em que a energia espectral do sinal de tensão é decomposta em termos da energia dos coeficientes *wavelet* e escala. As energias dos coeficientes escala das tensões de fase são utilizadas para a caracterização da queda de tensão, fornecendo índices de afundamento (magnitude e duração) de acordo com a definição. No entanto, a análise das energias dos coeficientes *wavelet* dessas tensões fornece informações adicionais para a identificação dos pontos inicial e final do afundamento de tensão. Neste trabalho, o cálculo das energias dos coeficientes escala e *wavelet* em tempo real apresentou diferenças em relação aos outros trabalhos, nos quais os efeitos de borda de uma janela deslizante foram contemplados. Além disso, estas energias foram pouco afetadas pela escolha da *wavelet* mãe, revelando um melhor desempenho da TWDR. O algoritmo apresentou maior robustez quanto ao aumento da velocidade na detecção dos pontos inicial e final do afundamento de tensão, condição *sine qua non* para a manutenção do funcionamento adequado da maioria dos equipamentos elétricos.

Muitas técnicas e ferramentas matemáticas podem ser empregadas, bem como a combinação entre elas, quando se quer trabalhar com processamento de sinais. RNAs têm também se mostrado bastante eficazes na resolução de problemas que envolvem classificação de padrões. Em Shah e Bhalja (2013), o problema da proteção diferencial é contemplado e estudado por meio da combinação de duas técnicas: TWD e uma topologia de RNA, a SVM (do inglês, *Support Vector Machine*). A detecção e extração de características é realizada por meio da TWD, enquanto que a SVM realiza a classificação dos sinais. O esquema proposto apresentou um funcionamento estável durante perturbações externas, incluindo correntes de magnetização, sobreexcitação e saturação de TCs, e uma maior sensibilidade durante os mais variados tipos de faltas internas, como faltas no primário ou secundário e faltas entre espiras. O sistema teve um bom desempenho também para os diversos tipos de conexão do transformador de potência.

Em Costa (2014), a metodologia apresentada em Costa e Driesen (2013) é estendida para a detecção em tempo real de transientes induzidos por falta em linhas de transmissão, na qual a energia dos coeficientes *wavelet* leva em consideração os efeitos de borda da janela deslizante do sinal. Como consequência, o novo método de detecção de falta baseado nas *wavelets* não foi afetado pela escolha da *wavelet* mãe, não apresentou atraso na detecção do instante de falta para diferentes famílias *wavelets* em vários níveis de de-

composição e a detecção de faltas foi pouco influenciada pelo ângulo de incidência de falta, resistência de falta e localização da falta. O desempenho da metodologia proposta foi avaliado por meio de dados simulados e reais.

## 2.2 Proteção Diferencial de Transformadores de Potência

A proteção diferencial, empregando relés diferenciais percentuais, surge como um trabalho pioneiro nessa linha de pesquisa por volta de 1930. Nesse período, Cordray (1931) destaca o problema da proteção de transformadores de três enrolamentos. Esta proteção opera a diferença vetorial das correntes que entram e saem do transformador. Ela não deve ser sensível para faltas externas, isto é, o vetor diferença das correntes que entram e saem deve ser zero, a menos que ocorra uma situação de uma falta interna, como uma falta entre espiras de enrolamentos diferentes ou até mesmo regiões de uma mesma espira. Nesta filosofia de proteção, um valor de limiar é definido, a partir do qual o relé poderá atuar para uma dada condição. Para o controle dos efeitos da corrente de magnetização do transformador, que pode atingir picos de 8 a 11 vezes o valor da corrente de carga nominal do transformador em até 60 ciclos da frequência de operação do sistema, é proposto um esquema no qual se pretende aumentar o ajuste do relé diferencial quando o banco de transformadores de potência é energizado. Nesse esquema, enquanto o banco de transformadores está desenergizado, os contatos de um relé de tensão conectam-se a resistores em paralelo com as bobinas de operação do relé diferencial, aumentando assim a sua corrente de ajuste. Quando o transformador é energizado, o relé de tensão opera após um intervalo de tempo pré-determinado, desconectando os resistores após a cessação da corrente transitória de magnetização.

Hayward (1941) propõe a utilização de um relé diferencial percentual com restrição de correntes harmônicas para prover proteção a um transformador de dois enrolamentos. Os elementos diferenciais desse relé são ligados aos terminais secundários dos dois TCs através de dois circuitos paralelos. O primeiro circuito corresponde à bobina de operação do relé e é um filtro passa-baixa, sintonizado apenas para passar as correntes na frequência fundamental do sistema e oferecer alta impedância para as componentes harmônicas. O segundo circuito corresponde à bobina de restrição, sendo ajustado para bloquear correntes na frequência do sistema e deixar passar as componentes harmônicas. Esse dispositivo foi aplicado e testado em um transformador monofásico de 333 kVA, com relação de espiras de 13800/460 V, 60 Hz. Algumas situações de faltas internas, bem como de correntes de magnetização, seja por um evento de energização do transformador, ou seja, pela presença da tensão de restabelecimento transitória devido à remoção de uma falta,

foram avaliados de acordo com o comportamento dos componentes de frequência dos sinais diferenciais.

Em Mckenna (1950), a existência de *taps* nas bobinas dos relés diferenciais percentuais para ajuste de erros devido aos transformadores auxiliares de corrente, bem como a própria característica diferencial percentual, em que a corrente mínima de atuação ou *pick-up* é escolhida ser um valor percentual da menor corrente de restrição do relé, conferiram melhores resultados nesse tipo de proteção, quanto à prevenção de atuações incorretas, em comparação com a proteção feita pelos tradicionais relés de sobrecorrente. Além desses resultados, o problema da defasagem angular entre as correntes primárias e secundárias que fluem pelo transformador de potência, o qual existe pelo tipo de conexão dos seus enrolamentos, pôde ser corrigido pela conexão adequada dos transformadores auxiliares de corrente.

A possibilidade de mau funcionamento da proteção diferencial com restrição de correntes de segunda harmônica para casos de faltas internas é vista em Liu et al. (1992). Esse problema é analisado por três algoritmos para um grande número de casos de faltas e energizações de transformadores. Os dados utilizados são baseados em testes, em tempo real, em um transformador de laboratório. Como resultados, o conteúdo da segunda harmônica para casos de faltas internas é significativo, tornando-se, algumas vezes, até maior que nos casos de energização de transformadores. Contudo, é observado também que a percentagem de componente de segunda harmônica em relação à componente fundamental atenua mais rápido nos casos de faltas internas. Assim, a operação com demasiado atraso de tempo pode ser evitada e a amplitude da taxa de restrição de segunda harmônica pode ser reduzida para menores valores percentuais, como 7,5% ou menos.

Em transformadores de subestações, cujos enrolamentos secundários muitas vezes são conectados na configuração estrela-aterrado, a resistência de terra pode limitar os danos causados pela componente de falta de sequência zero que flui pelo neutro do transformador à terra. Sutherland (2000) comenta sobre a utilização de relés específicos para a proteção dos enrolamentos de um transformador aterrado por uma resistência, como relés de tempo de sobrecorrente, relés diferenciais percentuais, relés de sobrecorrente direcionais e relés digitais multifuncionais. Alguns esquemas de proteção de terra utilizando essas diferentes topologias são propostos e analisados. É destacada a utilização dos relés microprocessados multifuncionais, com a proteção diferencial de terra associada às funções diferencial percentual e sobrecorrente direcional. A escolha do método ideal mostrou-se uma função do tamanho e da potência do transformador, do tipo e da magnitude da corrente de falta e do valor da resistência de terra.

O princípio diferencial percentual mostrou excelentes resultados na melhoria da segu-

rança da proteção para faltas externas com saturação dos TCs. Contudo, ainda apresenta falhas na correta discriminação entre faltas internas e falsas correntes diferenciais causadas pela energização e sobreexcitação dos transformadores. Os métodos utilizados para resolver esses problemas utilizam conteúdo harmônico ou reconhecimento de forma de onda. Porém, casos com baixo conteúdo harmônico na corrente diferencial ainda estão sem solução. Vazquez et al. (2008) descreve um novo algoritmo baseado na extração de características das correntes diferenciais trifásicas. Esse algoritmo utiliza a análise de componentes principais (PCA, do inglês, *Principal Component Analysis*), cujo objetivo é implementar um processo de reconhecimento de padrões em um espaço bidimensional, denominado espaço de características. A frequência de amostragem utilizada é de 4 kHz e o tamanho da janela de dados é de 64 amostras. O algoritmo foi avaliado com 3.170 casos de simulação, para diferentes valores de carga, curva de saturação, impedância da fonte e relações dos transformadores de corrente. Em todos os casos, o algoritmo discriminou corretamente faltas internas de condições de *inrush* e sobreexcitação.

Sabe-se que diferentes fenômenos eletromagnéticos de características transitórias ocorrem nas proximidades dos transformadores de potência. Em se tratando de um problema de proteção, é de grande importância a determinação do intervalo de tempo no qual ocorrem determinadas componentes espectrais, as quais estão presentes nos sinais dos distúrbios. As técnicas baseadas nas *wavelets* têm-se mostrado bastante resolutas nesse aspecto, possibilitando uma boa representação do sinal nos domínios do tempo e da frequência. Oliveira e Bretas (2009) apresentam uma nova abordagem para a proteção diferencial de transformadores utilizando a TWD. O algoritmo é dividido em um bloco de detecção e um bloco de discriminação do distúrbio. O critério para a discriminação correta entre faltas internas, externas e correntes de *inrush* é baseado em um índice que quantifica as características dos coeficientes *wavelet* das correntes diferenciais na primeira escala. A variação da energia espectral dos coeficientes *wavelet* na primeira escala é utilizada como parâmetro nessa discriminação. O esquema proposto foi implementado no Matlab e utilizado em um sistema teste de 138 kV, com um transformador de 35 MVA, no software ATP/EMTP, para diferentes casos de energização, faltas internas e externas próximas ao transformador. O desempenho do algoritmo foi validado para diferentes valores de resistência de falta, mudanças de carga e diferentes *wavelets* mãe. Resultados mostraram que a *wavelets* mãe da família *Daubechies* apresentaram melhor desempenho em comparação com as *wavelets* mãe da família *Symlet* e a *Haar*.

Behrendt, Fischer e Labuschagne (2011) estuda a aplicação dos métodos de restrição de harmônicos e bloqueio de harmônicos em relés diferenciais de transformadores modernos, ao utilizar o conteúdo harmônico da corrente de operação para distinguir faltas

internas de correntes de *inrush*. Os dois métodos foram avaliados quanto à velocidade e segurança do esquema de proteção diferencial do transformador. O método de restrição de harmônicos apresentou maior segurança por causa dos benefícios da função de restrição para correntes de *inrush*, porém o método de bloqueio por harmônicos apresentou maior rapidez quanto à detecção de faltas internas. Ambas as técnicas não apresentaram adequação para prevenir a atuação do elemento diferencial de operação para casos de energização com baixo conteúdo harmônico na corrente de operação.

Em Tavares e Silva (2012), é proposto um estudo de modelagem e simulação numérica da proteção diferencial de transformadores de potência utilizando o ambiente *Models* do ATP. Para avaliação do desempenho do modelo do relé, situações como energização de transformadores, faltas internas à zona de proteção, faltas externas à zona de proteção e operação do transformador na ausência de carga foram testadas. Os resultados revelaram a vantagem da utilização deste tipo de modelagem, uma vez que fornece uma simulação em circuito fechado, podendo-se assim avaliar o comportamento do sistema de potência e da operação do esquema de proteção. Neste estudo, a influência dos ajustes do relé foi observada, de modo que uma possível desconsideração da corrente mínima de atuação e do cálculo da restrição dos harmônicos poderiam levar a uma incorreta operação do relé.

### 2.3 Resumo

Na Tabela 2.1 é apresentado, em ordem cronológica, um resumo da revisão bibliográfica realizada relacionando a utilização e emprego da transformada *wavelet* nas áreas de proteção de sistemas elétricos e qualidade de energia. Nesta tabela são listados e avaliados alguns aspectos, tais como: tipo de estudo realizado, técnica empregada e validação dos dados (testes reais ou de simulação).

Tabela 2.1: Resumo da revisão bibliográfica referente aos métodos *wavelets* empregados na proteção de sistemas elétricos e na qualidade de energia.

Referência	Tipo de Estudo	Elemento Estudo	Técnica Empregada	Validação	
				Sim.	Exp.
Gomez-Morante e Nicoletti (1999)	Proteção diferencial	Transformador	TW <sup>a</sup>	✓	-
Chen et al. (2003)	Proteção direcional	LT <sup>b</sup>	TWD <sup>c</sup>	✓	-
Pradhan et al. (2004)	Compensação série	LT	TWD + Fuzzy	✓	-
Osman e Malik (2004)	Proteção de distância	LT	TW	✓	✓
Saleh e Rahman (2005)	Proteção diferencial	Transformador	TWP <sup>d</sup>	✓	✓
Megahed, Moussa e Bayoumy (2006)	Compensação série	LT	TWD	✓	-
Khan, Ozgonenel e Rahman (2007)	Proteção diferencial	Gerador Síncrono	TWP	✓	✓
Bhalja e Maheshwari (2008)	Proteção diferencial	LT com multi-terminais	TW	✓	-
Oliveira e Bretas (2009)	Proteção diferencial	Transformador	TWD	✓	-
Perez, Orduna e Guidi (2011)	Classificação de transitórios	LT	AWA <sup>e</sup>	✓	-
Eissa (2012)	Proteção diferencial	Barramento	TWC	✓	-
Costa e Driesen (2013)	Caracterização de afundamentos de tensão	-	TWD, TWDR <sup>f</sup>	✓	-
Shah e Bhalja (2013)	Proteção diferencial	Transformador	TWD + RNAs	✓	-
Costa (2014)	Deteção de transitórios induzidos por faltas	LT	TWDR com bordas	✓	-

<sup>a</sup>Transformada *wavelet*<sup>b</sup>Linha de transmissão<sup>c</sup>Transformada *wavelet* discreta<sup>d</sup>Transformada *wavelet packet*<sup>e</sup>Algoritmo *wavelet* adaptativo<sup>f</sup>Transformada *wavelet* discreta redundante

---

## Capítulo 3

# Fundamentos da Proteção Diferencial

---

Transformadores são dispositivos do sistema de potência susceptíveis à faltas internas, cujos tipos mais comuns são as faltas envolvendo os enrolamentos. Em geral, estes dispositivos podem ser protegidos por fusíveis, relés de sobrecorrente, relés diferenciais e relés de pressão (HOROWITZ; PHADKE, 2008). A escolha do esquema de proteção adequado depende de alguns fatores, tais como a potência do transformador, localização, tensão nominal do sistema e o tipo do transformador. Neste capítulo será descrita a metodologia da proteção diferencial de transformadores de potência.

### 3.1 Transformadores

Um transformador é uma máquina estática, sendo constituído por dois ou mais circuitos elétricos acoplados por um circuito magnético comum. Embora não seja um dispositivo de conversão de energia, o transformador é um componente indispensável nos sistemas de conversão de energia, possibilitando a transferência da energia elétrica gerada nos mais diversos níveis de tensão adequados aos consumidores industriais e residenciais (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Na Figura 3.1 é ilustrado o esquema monofásico de um transformador ideal com carga, no qual é suposto que as resistências dos enrolamentos primário e secundário são desprezíveis, que todo o fluxo está confinado ao núcleo enlaçando ambos os enrolamentos (o fluxo disperso é considerado desprezível), que não há perdas no núcleo e que a permeabilidade do núcleo é tão alta que apenas uma força magnetomotriz (FMM) de excitação insignificante seja requerida para criar o fluxo (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

De acordo com essas suposições, quando uma tensão variável no tempo  $v_1(t)$  é aplicada aos terminais do primário do transformador, então um fluxo  $\phi(t)$  deve ser estabelecido no núcleo do transformador, de modo que a força contra-eletromotriz  $e_1(t)$  seja igual

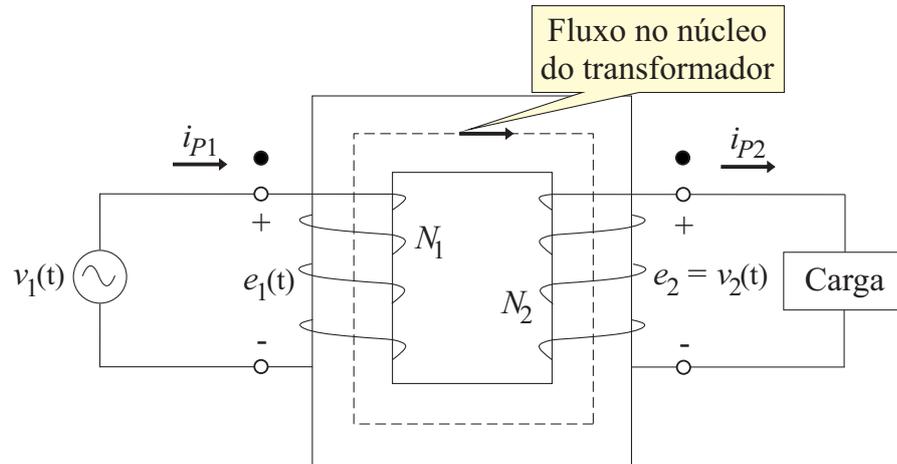


Figura 3.1: Esquema de um transformador ideal com carga.

à tensão aplicada. Dessa maneira, tem-se:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}, \quad (3.1)$$

em que  $N_1$  corresponde ao número de espiras no enrolamento primário. O fluxo do núcleo também concatena o enrolamento secundário produzindo uma força eletromotriz induzida  $e_2(t)$  e uma tensão induzida nos terminais de saída  $v_2(t)$ , dadas por:

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}, \quad (3.2)$$

em que  $N_2$  corresponde ao número de espiras no enrolamento secundário. Da razão entre as equações (3.1) e (3.2), tem-se:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (3.3)$$

Portanto, a relação de tensões primária e secundária em um transformador ideal é diretamente proporcional à razão entre suas espiras.

Segundo Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006), a conexão de uma carga ao enrolamento secundário do transformador provoca o aparecimento de uma corrente  $i_{p2}$  e uma FMM  $N_2 i_{p2}$  nesse enrolamento. Como supõe-se que a permeabilidade do núcleo seja bastante elevada e que o fluxo do núcleo seja estabelecido pela tensão aplicada ao enrolamento primário  $v_1$ , então o fluxo do núcleo não se alterará com a presença de uma carga no secundário, e, conseqüentemente, a FMM líquida de excitação que atua no núcleo

$(N_1 i_{P1} - N_2 i_{P2})$  também não se alterará, permanecendo desprezível, de modo que:

$$N_1 i_{P1} - N_2 i_{P2} = 0, \quad (3.4)$$

$$N_1 i_{P1} = N_2 i_{P2}, \quad (3.5)$$

em que  $i_{1P}$  e  $i_{2P}$  são, respectivamente, as correntes primária e secundária que fluem pelo transformador. Dessa forma, deve surgir no primário uma FMM de compensação para cancelar a FMM do secundário.

Em estudos que envolvem energização de transformadores, ferrossonância e rejeição de carga, torna-se necessária a utilização de um modelo mais realista que inclua o comportamento não-linear do transformador. Na Figura 3.2 apresenta-se o modelo do transformador real, composto por um transformador ideal, perdas nos enrolamentos (resistências  $R_1$  e  $R_2$ , e indutâncias de dispersão  $L_1$  e  $L_2$ ) e ramo não linear (perdas no núcleo, modeladas a partir da resistência de magnetização  $R_m$  e indutor não linear, modelado a partir da indutância  $L_m$ ).

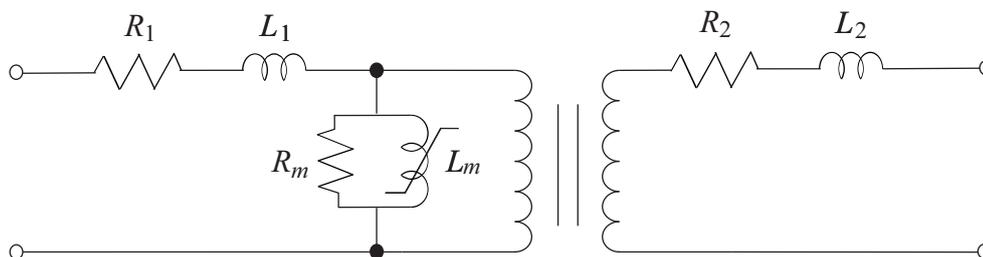


Figura 3.2: Modelo saturável de um transformador monofásico.

O ATP contém rotinas auxiliares para o cálculo dos parâmetros que constituem o ramo não-linear ou ramo magnetizante dos transformadores (IEEE Power System Relaying Committee, 2004). A rotina SATURA contém o modelo saturável do transformador ilustrado na Figura 3.2.

A indutância não linear, isto é, a característica ou curva de saturação de um transformador de potência é obtida por meio da localização dos pontos (corrente, fluxo) quando o transformador é energizado com o secundário em aberto. Na Figura 3.3 é ilustrado um exemplo hipotético de curva de saturação de um transformador, composta por apenas duas inclinações, em que a primeira corresponde à região linear e a segunda corresponde à região de saturação do transformador.

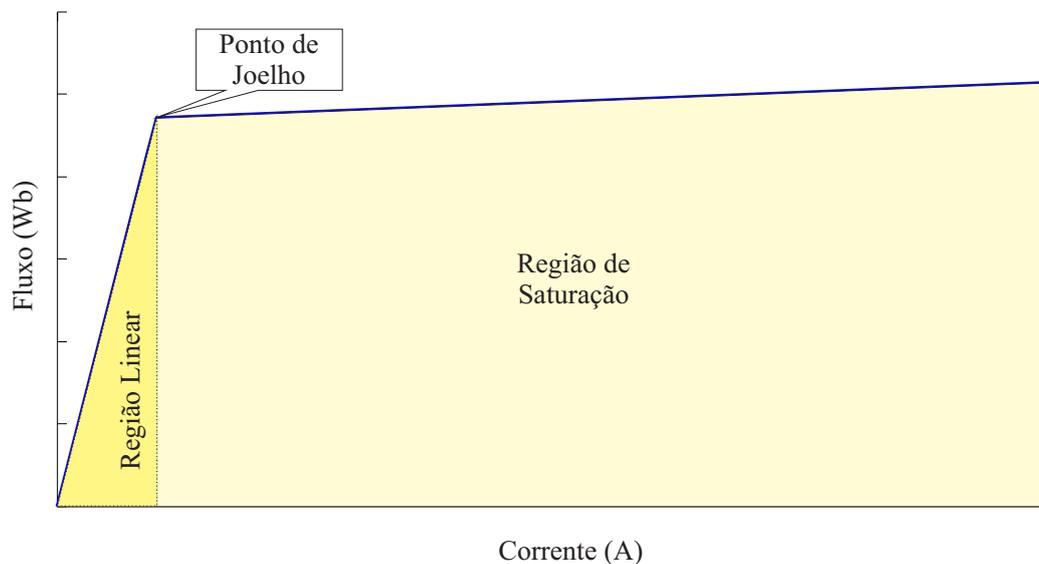


Figura 3.3: Curva de saturação de um transformador.

## 3.2 Proteção Diferencial Convencional

Basicamente, o princípio da proteção diferencial é baseado na comparação entre as correntes primárias e secundárias que fluem pelo transformador de potência em conformidade com a lei de Kirchhoff das correntes. A leitura dessas correntes é feita por meio de TCs instalados nos ramos primário e secundário do transformador. Na Figura 3.4 é ilustrado o diagrama unifilar da proteção diferencial empregada em um transformador de potência.

De acordo com a Figura 3.4, considerando-se a conexão dos TCs nos ramos primário e secundário do transformador com relações de transformação de  $1:n_1$  e  $1:n_2$ , respectivamente, a equação (3.5) pode ser escrita da seguinte forma:

$$N_1 n_1 i_{S1} = N_2 n_2 i_{S2}, \quad (3.6)$$

em que  $i_{S1}$  e  $i_{S2}$  correspondem às correntes secundárias do TC1 e do TC2 (Figura 3.4). A condição de funcionamento ideal do transformador resulta em  $i_{S1} = i_{S2}$ . Desta condição, tem-se que:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (3.7)$$

o que indica que os TCs são escolhidos de modo que suas relações de transformação atendam a esta condição.

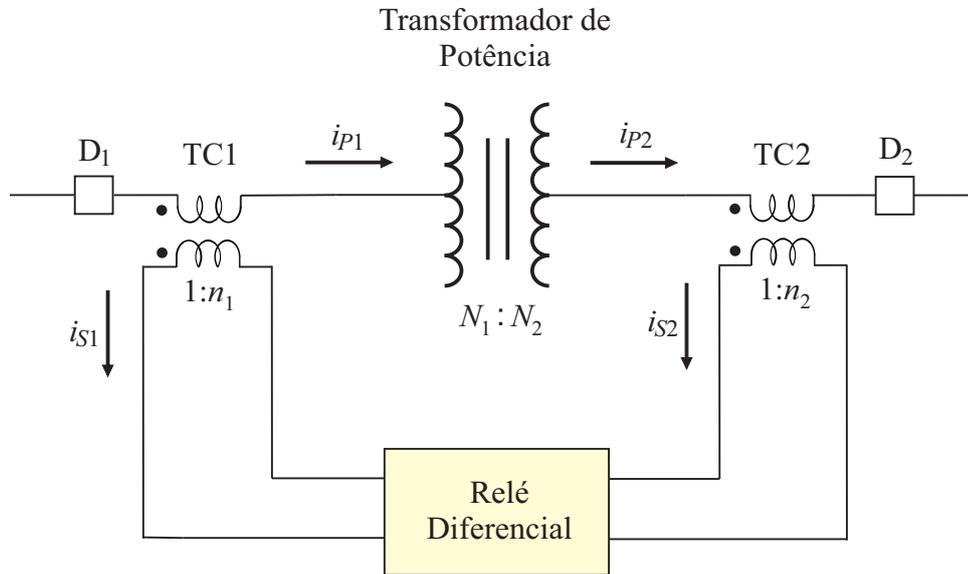


Figura 3.4: Proteção diferencial percentual de transformador monofásico.

Em algumas conexões de transformadores de potência, as correntes no enrolamento primário não estão em fase com as correntes no enrolamento secundário. Por exemplo, em um transformador trifásico delta-estrela, as correntes que fluem pelo enrolamento primário estão adiantadas em  $30^\circ$  das correntes secundárias. Segundo Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (a), com a utilização de relés eletromecânicos, a compensação da diferença angular era feita na conexão dos TCs, ou seja, o enrolamento secundário do TC do lado delta do transformador de potência era conectado na configuração estrela, enquanto que o enrolamento primário do TC do lado estrela do transformador de potência era conectado em delta. Porém, com o advento dos relés microprocessados, a compensação angular passou a ser implementada no próprio *software* do relé, estando os TCs conectados de qualquer maneira.

Para uma situação de falta interna, a condição da equação (3.7) não é observada e a diferença entre as correntes  $i_{S1}$  e  $i_{S2}$  tende a aumentar. As correntes  $i_{S1}$  e  $i_{S2}$  são sinais de entrada para o cálculo das correntes diferenciais de operação ( $i_D$ ) e de restrição ( $i_R$ ), que fluem pelo relé diferencial percentual. De acordo com a polaridade dos TCs adotada a partir da Figura 3.4, as correntes  $i_D$  e  $i_R$  são calculadas como:

$$i_D = i_{S1} - i_{S2}, \quad (3.8)$$

$$i_R = \frac{i_{S1} + i_{S2}}{2}. \quad (3.9)$$

Estas equações são extendidas para análise em transformadores trifásicos, nas quais os índices  $A$ ,  $B$  e  $C$  indicam as fases  $A$ ,  $B$  e  $C$ , respectivamente, nas correntes  $i_{S(A,B,C)1}$ ,  $i_{S(A,B,C)2}$ ,  $i_{D(A,B,C)}$  e  $i_{R(A,B,C)}$ .

Alguns fatores, como perdas no transformador de potência, erros nas relações de transformação das correntes dos TCS, bem como a existência de comutadores nos enrolamentos de transformadores de potência podem causar uma corrente diferencial, mesmo para os casos de fluxo de carga normal, ou faltas externas. Relés diferenciais percentuais proporcionam uma excelente solução para este problema. Em um relé diferencial percentual, para que uma falta interna seja detectada, a corrente diferencial de operação  $i_D$  deve exceder uma certa percentagem da corrente diferencial de restrição  $i_R$ . Segundo Bernardes (2006), o relé diferencial percentual deverá atuar se as duas seguintes condições forem verdadeiras:

$$i_D > I_{PU}, \quad (3.10)$$

$$i_D > K i_R, \quad (3.11)$$

em que  $K$  é uma constante que assume valores entre 0 e 1 e representa a inclinação percentual da característica diferencial do relé;  $I_{PU}$  representa a corrente mínima de atuação do relé. Portanto, pequenas correntes diferenciais são esperadas sem que o relé seja sensibilizado (BERNARDES, 2006). Na Figura 3.5 é apresentada a curva de atuação do relé diferencial percentual, destacando suas regiões de operação (região hachurada) e restrição, conforme descrito em Horowitz e Phadke (2008).

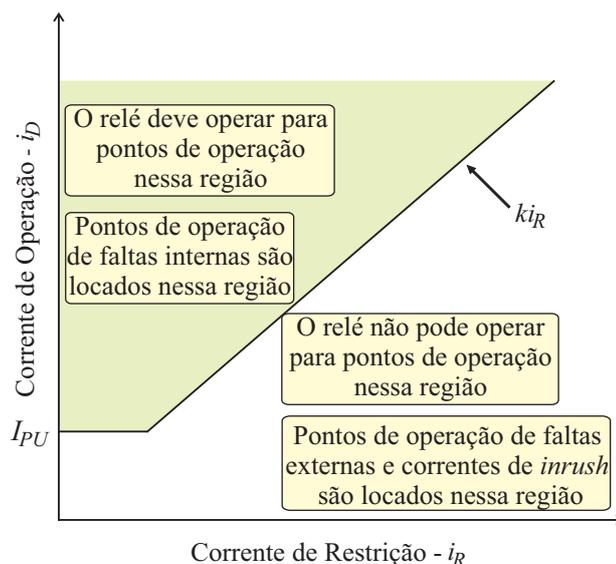


Figura 3.5: Característica de atuação da proteção diferencial percentual.

### 3.3 Proteção Diferencial Percentual com Restrição por Harmônicos

Correntes de *inrush* ou condições de sobreexcitação de transformadores produzem correntes diferenciais indesejadas, podendo vir a provocar uma incorreta operação do relé. Esses fenômenos apresentam correntes diferenciais distorcidas, uma vez que estão relacionados com a saturação do núcleo do transformador de potência. Alguns trabalhos, tais como Guzman et al. (2002), Behrendt, Fischer e Labuschagne (2011) e Einvall e Linders (1975) têm avaliado a predominância de componentes harmônicas sobre os distúrbios que envolvem a proteção de transformadores de potência, tal como listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Distúrbios em transformadores e suas respectivas componentes harmônicas mais predominantes.

Distúrbios	Fundamental	2°	3°	5°
Correntes de <i>inrush</i>	✓	✓	-	-
Sobreexcitação	✓	-	✓	✓
Falta interna	✓	-	-	-
Falta externa com saturação dos TCs	✓	-	✓	-

De acordo com a Tabela 3.1, o aparecimento de componentes harmônicas e a presença de formas de onda distorcidas nesses distúrbios provêm informação que ajuda a discriminar correntes de *inrush*, saturação dos TCs e condições de sobreexcitação de faltas internas (BEHRENDT; FISCHER; LABUSCHAGNE, 2011).

Segundo Behrendt, Fischer e Labuschagne (2011), relés diferenciais percentuais modernos, ao contrário dos primeiros relés diferenciais, que dessensibilizavam temporariamente durante a energização do transformador, têm utilizado o conteúdo harmônico da corrente diferencial de operação para restringir ou bloquear o dispositivo, de modo a distinguir a ocorrência de faltas internas de condições de sobreexcitação e correntes de *inrush*.

Entre esses modernos relés, os relés diferenciais com a função de restrição por harmônicos englobam o conceito da função diferencial percentual, criando uma corrente de restrição adicional a partir do conteúdo harmônico selecionado de múltiplas correntes de entrada. Este conceito é expresso nas seguintes equações:

$$I_{REST} = KI_{RT} + (K_2I_2 + K_3I_3 + \dots + K_hI_h), \quad (3.12)$$

$$I_{OP} > I_{REST}, \quad (3.13)$$

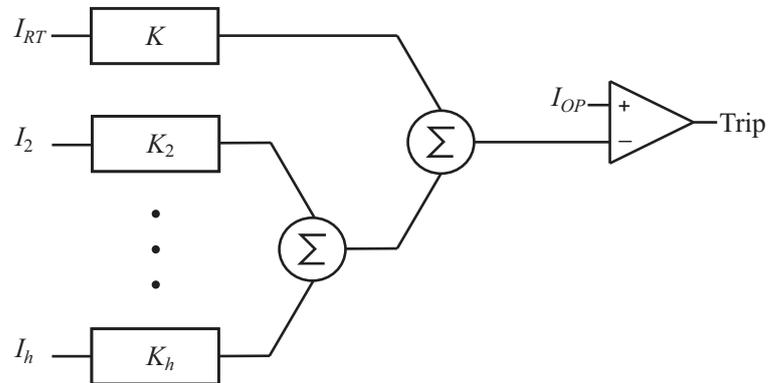


Figura 3.6: Diagrama lógico para a função diferencial com restrição de harmônicos.

em que  $K_h$  é uma constante para cada componente harmônica  $h > 1$ ,  $I_h$  corresponde ao conteúdo harmônico de ordem  $h$  medido em relação à corrente fundamental de operação  $I_{OP}$  e  $I_{RT}$  corresponde à corrente fundamental de restrição. A equação (3.13) pode ser representada em um diagrama de blocos, conforme ilustrado na Figura 3.6.

O fator  $K_h$  no elemento de restrição de harmônicos é tipicamente baseado no inverso do valor percentual da componente harmônica  $h$  em relação à componente fundamental. Por exemplo, uma configuração de 10% para a restrição de segunda harmônica significa que 10 vezes a componente de segunda harmônica será adicionada à corrente fundamental de restrição. Do mesmo modo, uma configuração de 20% significa que 5 vezes a componente de segunda harmônica será adicionada à corrente de restrição. Quanto menor o ajuste da percentagem, maior será o efeito da restrição (BEHRENDT; FISCHER; LABUSCHAGNE, 2011). De um modo geral, as componentes fundamental e harmônicas são extraídas por meio de algoritmos baseados na transformada de *Fourier*.

### 3.3.1 Algoritmo de *Fourier* de um Ciclo

Segundo Oppenheim e Schaffer (2006) e Silva (2009), a série de *Fourier* de um sinal periódico  $x(t)$  é dada por:

$$x(t) = \frac{Y_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} Y_{ch} \cos(2\pi h f t) + \sum_{n=1}^{\infty} Y_{sh} \sin(2\pi h f t), \quad (3.14)$$

em que  $f$  corresponde à frequência fundamental do sistema e  $h f$  corresponde à  $h$ -ésima componente harmônica do sinal  $x(t)$ .

Os coeficientes da série de *Fourier* são dados por:

$$Y_0 = \int_t^{t+T} x(t) dt, \quad (3.15)$$

$$Y_{ch} = \int_t^{t+T} x(t) \cos(hwt) dt, \quad (3.16)$$

$$Y_{sh} = \int_t^{t+T} x(t) \sen(hwt) dt, \quad (3.17)$$

em que  $T$  e  $w$  correspondem, respectivamente, ao período e à frequência angular do sinal  $x(t)$ . Os coeficientes correspondentes à mesma frequência harmônica podem ser combinados, de modo que a equação (3.14) possa ser reescrita da seguinte maneira:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sen(hwt + \Phi_n), \quad (3.18)$$

em que:

$$A_h = \begin{cases} \frac{Y_0}{2}, \Phi_0 = 0, & \text{para } h = 0 \\ \sqrt{Y_{ch}^2 + Y_{sh}^2}, \Phi_h = \tan^{-1} \left( \frac{Y_{sh}}{Y_{ch}} \right), & \text{para } h \neq 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

Por meio deste algoritmo, quaisquer componentes de frequências de um sinal  $x(t)$  podem ser extraídas, calculando-se o produto de um ciclo de amostras desse sinal com as funções seno e cosseno, conforme expressado nas equações (3.16) e (3.17). Considerando-se  $\Delta k$  o número de amostras presentes em um ciclo da frequência fundamental de  $x(t)$ , as integrais presentes nas equações (3.16) e (3.17) podem ser calculadas como (JOHNS; SALMAN, 1995):

$$Y_{ch} \approx \frac{2}{\Delta k \Delta t} (x(0) \cos(hwt_0) + x(1) \cos(hwt_1) + x(2) \cos(hwt_2) + x(\Delta k - 1) \cos(hwt_{\Delta k - 1}) \Delta t), \quad (3.20)$$

$$Y_{sh} \approx \frac{2}{\Delta k \Delta t} (x(0) \sen(hwt_0) + x(1) \sen(hwt_1) + x(2) \sen(hwt_2) + x(\Delta k - 1) \sen(hwt_{\Delta k - 1}) \Delta t), \quad (3.21)$$

em que  $\Delta t$  corresponde ao passo de amostragem utilizado e  $t_k = k\Delta t$ . Reorganizando as equações (3.20) e (3.21), obtém-se:

$$Y_{ch} = \frac{2}{\Delta k} \sum_{k=0}^{\Delta k - 1} x(k) \cos \left( \frac{2\pi h k}{\Delta k} \right), \quad (3.22)$$

$$Y_{sh} = \frac{2}{\Delta k} \sum_{k=0}^{\Delta k - 1} x(k) \sen \left( \frac{2\pi h k}{\Delta k} \right), \quad (3.23)$$

que representam o processo de filtragem digital do algoritmo de *Fourier* de um ciclo, podendo ser escritas como:

$$Y_{ch} = \sum_{k=0}^{\Delta k-1} x(k)H_c(k), \quad (3.24)$$

$$Y_{sh} = \sum_{k=0}^{\Delta k-1} x(k)H_s(k), \quad (3.25)$$

em que  $H_c$  e  $H_s$  correspondem, respectivamente, aos coeficientes dos filtros relacionados às partes real ( $H_c$ ) e imaginária ( $H_s$ ) do fasor, dados por:

$$H_c = \frac{2}{\Delta k} \left[ \cos(wh\Delta t_0) \quad \cos(wh\Delta t_1) \quad \cos(wh\Delta t_2) \cdots \cos(wh\Delta t_{\Delta k-1}) \right], \quad (3.26)$$

$$H_s = \frac{2}{\Delta k} \left[ \sin(wh\Delta t_0) \quad \sin(wh\Delta t_1) \quad \sin(wh\Delta t_2) \cdots \sin(wh\Delta t_{\Delta k-1}) \right]. \quad (3.27)$$

A amplitude e a fase do fasor correspondente à componente de frequência  $hf$  são calculados como:

$$A_h = \sqrt{Y_{ch}^2 + Y_{sh}^2}, \quad (3.28)$$

$$\Phi_h = \tan^{-1}\left(\frac{Y_{sh}}{Y_{ch}}\right). \quad (3.29)$$

### 3.3.2 Exemplo de Aplicação do Relé Diferencial Percentual com Restrição por Harmônicos

Para ilustrar o princípio de restrição por harmônicos, nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 é apresentado o comportamento das correntes  $I_{OP}$ ,  $I_{RT}$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_5$ , para um caso de energização, um caso de falta externa e um caso de falta interna ao transformador, respectivamente, em que foi utilizada uma taxa de amostragem de  $f_s = 960$  Hz (16 amostras por ciclo).

De acordo com a Figura 3.7, durante a energização do transformador, tem-se um aumento das correntes  $I_{OP}$ ,  $I_{RT}$  e  $I_2$ , indicando um elevado conteúdo da componente de segunda harmônica em relação à corrente fundamental de operação. Em um caso de falta externa, as correntes de restrição apresentaram-se maiores que as correntes de operação (Figura 3.8). Por outro lado, em um caso de falta interna, as correntes de operação, no instante da falta, atingiram valores maiores que as correntes de restrição, favorecendo a detecção do evento (Figura 3.9).

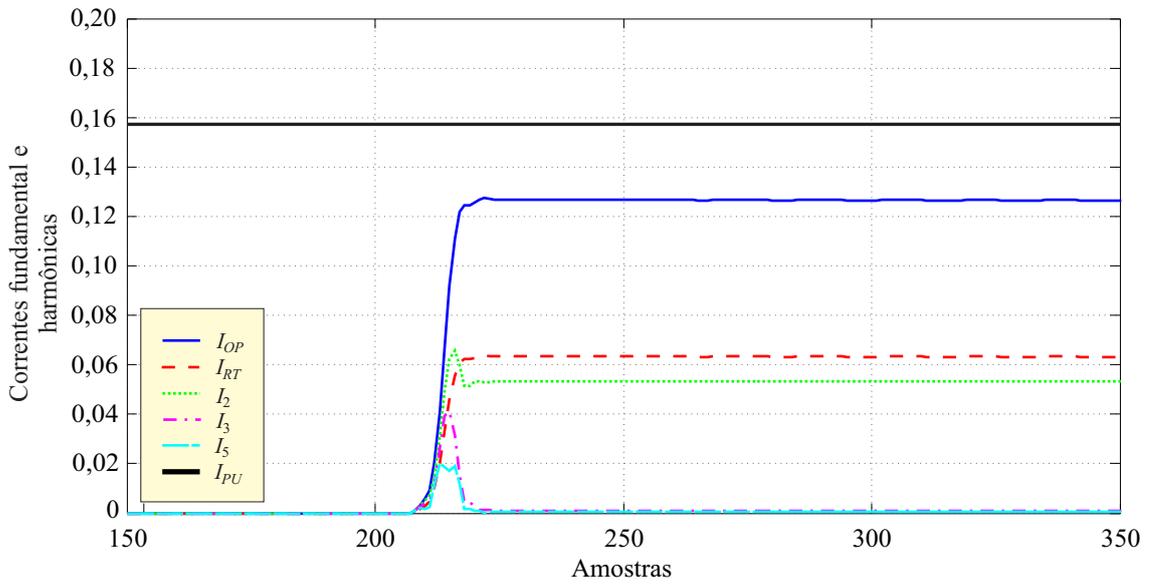


Figura 3.7: Estimação das amplitudes dos sinais de corrente  $I_{OP}$ ,  $I_{RT}$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_5$  em um caso de energização do transformador.

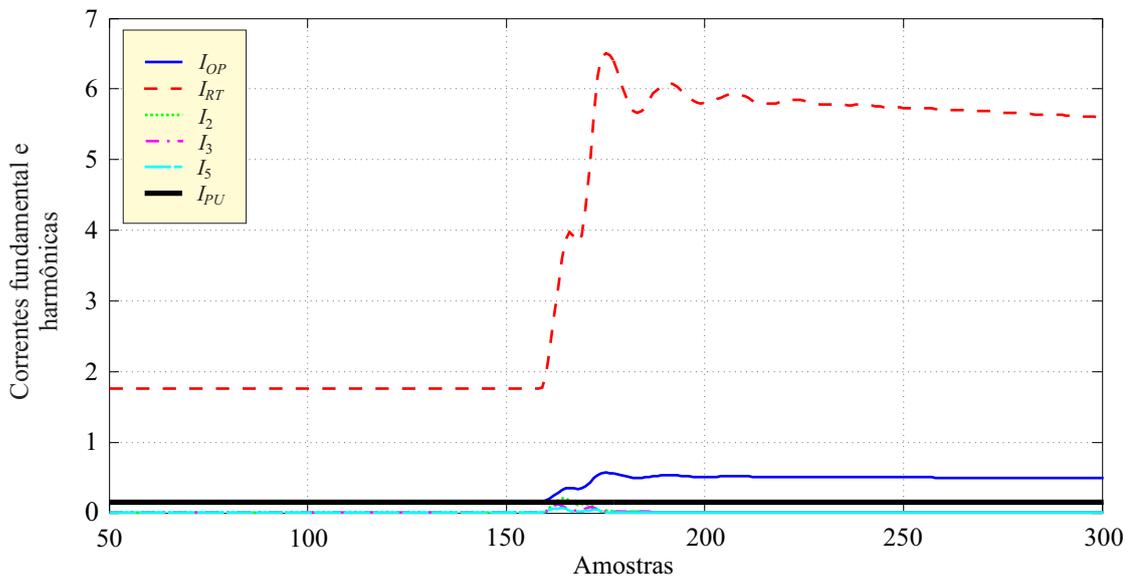


Figura 3.8: Estimação das amplitudes dos sinais de corrente  $I_{OP}$ ,  $I_{RT}$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_5$  em um caso de falta externa ao transformador.

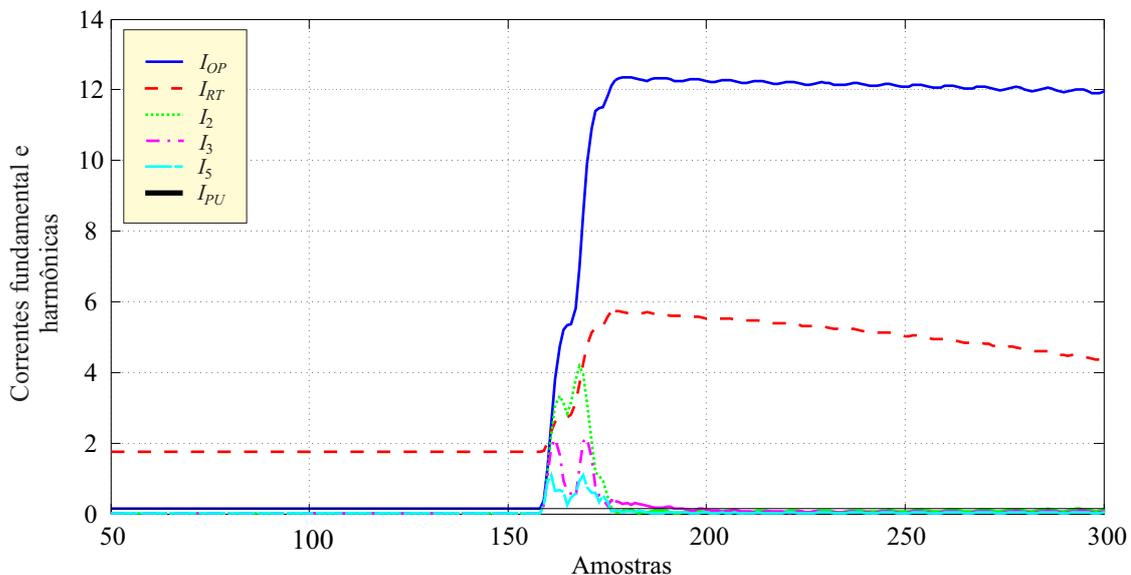


Figura 3.9: Estimação das amplitudes dos sinais de corrente  $I_{OP}$ ,  $I_{RT}$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_5$  em um caso de falta interna ao transformador.

Nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12 são apresentados os pontos de operação ( $I_{REST}$ ,  $I_{OP}$ ) para cada caso mencionado, respectivamente. Os pontos ( $I_{REST}$ ,  $I_{OP}$ ) foram calculados a partir da primeira amostra com distúrbios até dois ciclos pós-distúrbio, ou seja, tem-se 32 pontos de operação após o início do distúrbio para cada caso.

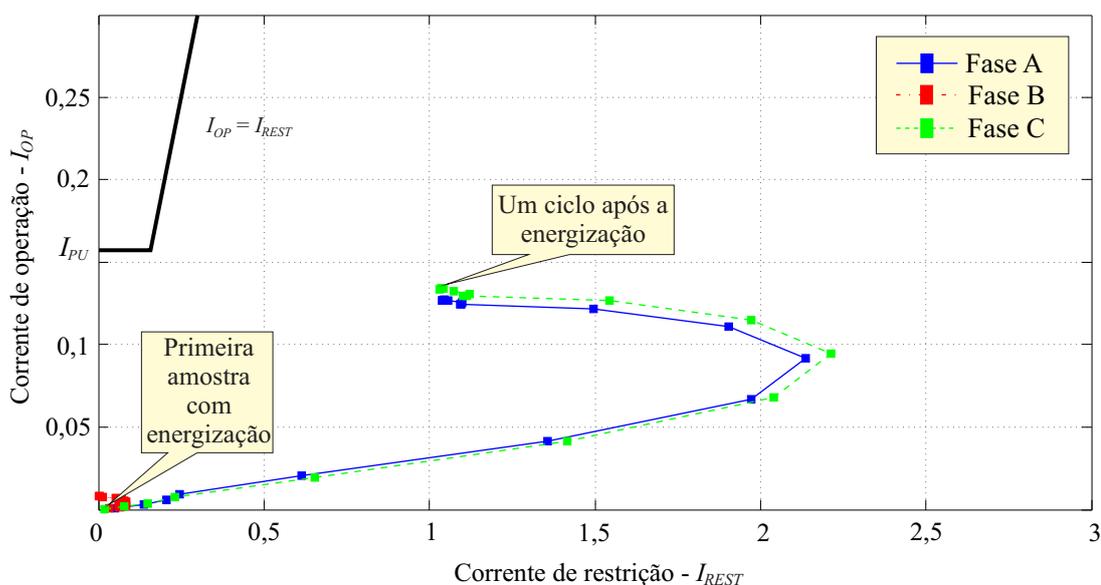


Figura 3.10: Trajetória dos pontos de operação ( $I_{REST}$ ,  $I_{OP}$ ) para um caso de energização do transformador.

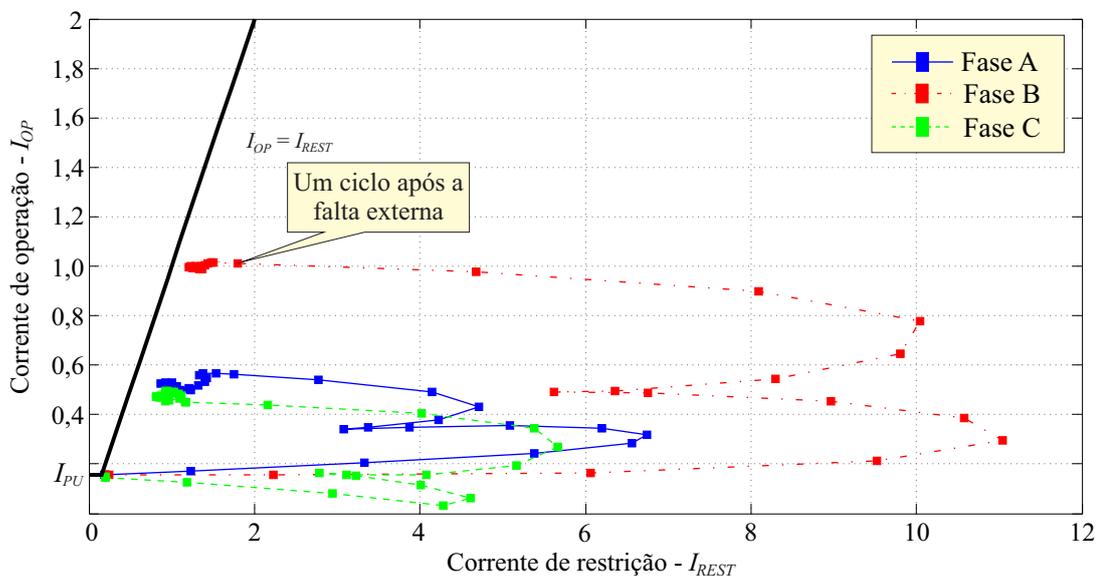


Figura 3.11: Trajetória dos pontos de operação ( $I_{REST}$ ,  $I_{OP}$ ) para um caso de falta externa ao transformador.

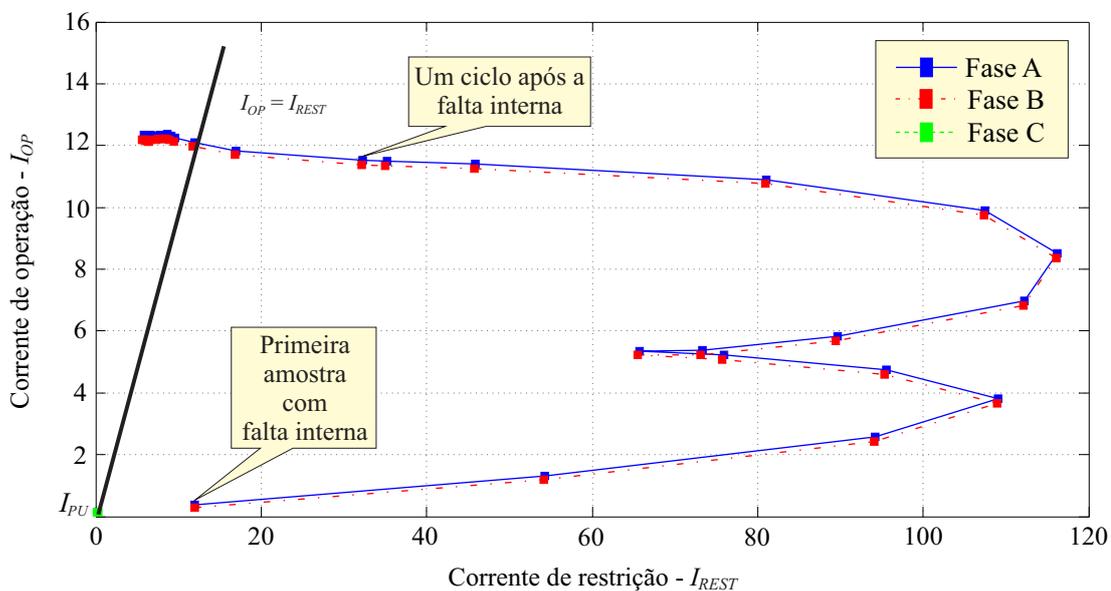


Figura 3.12: Trajetória dos pontos de operação ( $I_{REST}$ ,  $I_{OP}$ ) para um caso de falta interna ao transformador.

De acordo com as Figuras 3.10 e 3.11, para os casos de falta externa e energização do transformador, em dois ciclos pós-distúrbio, os pontos de operação ( $I_{REST}$ ,  $I_{OP}$ ) não convergiram para a região de operação da curva característica  $I_{OP} = f(I_{REST})$ . Porém, para o caso de falta interna, os pontos de operação convergiram para a região de operação

em aproximadamente um ciclo após a falta ter sido detectada (Figura 3.12). De um modo geral, o método de restrição por harmônicos apresenta um bom desempenho. No entanto, utilizando o algoritmo de *Fourier* de um ciclo, o método baseado no princípio de restrição por harmônicos apresenta uma convergência lenta na detecção de faltas, o que torna-se necessária a aplicação de novas técnicas, com tempo de convergência superior aos métodos clássicos, mas que possa apresentar desempenho equivalente, tal como o método de proteção diferencial baseado nas energias dos coeficientes *wavelet* das correntes diferenciais de operação e de restrição, o qual está sendo proposto nessa dissertação.

### 3.4 Causas das Falsas Correntes Diferenciais

Além das faltas externas, outros fenômenos podem provocar um fluxo de corrente substancial nos enrolamentos do transformador de potência, o qual pode vir a sensibilizar a atuação do relé diferencial percentual. Esses fenômenos estão relacionados às não-linearidades presentes no material ferromagnético do transformador de potência e dos transformadores de corrente (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Os principais fenômenos levados em consideração na proteção diferencial são:

- Corrente de magnetização ou *inrush* durante a energização do transformador;
- Sobreexcitação do transformador;
- Saturação dos TCs devido à elevada magnitude de correntes de falta.

#### 3.4.1 Corrente de *Inrush* Durante a Energização do Transformador

Em termos práticos, energizar um transformador significa aplicar uma tensão senoidal em seu enrolamento primário, estando o secundário em aberto. Devido a esse desbalanço entre os dois enrolamentos e à característica de magnetização presente no núcleo do transformador, correntes diferenciais podem sensibilizar o relé diferencial. Essas correntes são conhecidas como correntes de *inrush* e sua magnitude pode ser determinada pela inclinação da característica de magnetização na região de saturação e pela indutância de dispersão do transformador (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

Segundo Oliveira, Cogo e Abreu (1984), a equação para a energização de um transformador a vazio é dada por:

$$v_1 = R_1 i_0 + L_1 \frac{di_0}{dt} + N_1 \frac{d\phi}{dt}, \quad (3.30)$$

em que  $R_1$  e  $L_1$  correspondem, respectivamente, à resistência e à indutância do enrolamento primário do transformador,  $i_0$  corresponde à corrente de excitação e  $\phi$  corresponde ao fluxo. As parcelas  $R_1 i_0$ ,  $L_1 \frac{di_0}{dt}$  e  $N_1 \frac{d\phi}{dt}$  representam, respectivamente, a queda de tensão na resistência do primário, a queda de tensão devido ao fluxo disperso do primário e a força contra-eletromotriz induzida no primário.

A equação diferencial (3.30) é regida por uma relação não-linear entre o fluxo  $\phi$  e a corrente a vazio  $i_0$ , que torna necessária uma aproximação para a obtenção da corrente  $i_0$  por meio de duas partes: a solução complementar, que representa um termo transitório e a solução particular, que representa o regime permanente da operação. Essa corrente transitória de magnetização pode atingir altos valores em relação à corrente de carga nominal do transformador, a depender de dois fatores:

- Ângulo de fase da tensão no qual a chave é fechada;
- Condições magnéticas do núcleo, incluindo a intensidade e a polaridade do fluxo residual.

Desprezando os dois primeiros termos da equação (3.30) e admitindo que no instante da energização o ângulo da tensão possui um valor  $\theta$ , tem-se que:

$$v_1 = V_{1m} \text{sen}(\omega t + \theta) = N_1 \frac{d\phi}{dt}, \quad (3.31)$$

que após integração, tem-se uma solução para o fluxo instantâneo  $\phi$  no núcleo do transformador:

$$\phi = \phi_0 + \phi_m \cos(\theta) - \phi_m \cos(\omega t + \theta), \quad (3.32)$$

em que:

$$\phi_m = \frac{\sqrt{2} V_{1m}}{N_1 \omega}. \quad (3.33)$$

Nas equações (3.31) a (3.33),  $\phi_0$ ,  $V_{1m}$  e  $\omega$  compreendem o fluxo residual no instante  $t = 0$ , o valor de pico da tensão no instante da energização ( $t = 0$ ) e a frequência angular em rad/s, respectivamente. O termo contínuo  $\phi_0 + \phi_m \cos(\theta)$  apresenta amortecimento devido às perdas do circuito elétrico do transformador. Durante a energização, o valor de  $\phi_m$  pode ser bastante elevado, requerendo uma corrente  $i_0$  muito alta para produzi-lo.

O fato das correntes de *inrush* atingirem valores elevados, muitas vezes semelhantes aos valores de amplitude atingidos pelas correntes de falta interna em transformadores, exige da proteção a habilidade de fazer a distinção correta entre esses dois fenômenos. Dos métodos mais citados na literatura, o método de restrição por harmônicos é bastante estudado e utilizado nesse tipo de proteção. Neste método, basicamente, a componente de

frequência fundamental da corrente tende a operar o relé, enquanto que os componentes harmônicos tendem a restringi-lo. Sabe-se que a corrente de magnetização é rica em componentes harmônicos de 2º ordem, enquanto que as faltas internas geralmente limitam-se à componente de 60 Hz. Portanto, a forma de onda da corrente diferencial pode ser analisada por meio de uma relação percentual entre as componentes de segunda harmônica e fundamental e, conseqüentemente, o disparo do relé pode ser evitado na presença de correntes de *inrush* (KOLLA; GEDEON, 1995).

Na Figura 3.13 são ilustradas a corrente secundária que flui pelo TC2 ( $i_{SA2}$ ), conectado ao secundário do transformador de potência e a corrente diferencial de operação  $i_D$  em um caso de energização de um transformador a vazio (energização realizada a partir do terminal secundário com o terminal primário aberto), no qual se tem o aparecimento de correntes de *inrush*.

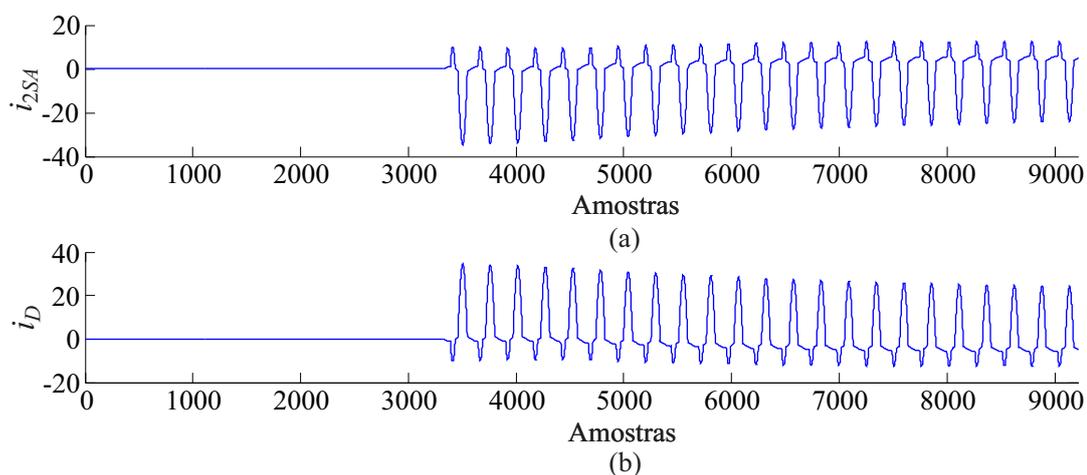


Figura 3.13: Correntes em um caso de energização de um transformador a vazio: a) Corrente secundária que flui pelo TC2; b) Corrente diferencial de operação.

Segundo Barbosa et al. (2011b), quando um transformador é energizado com outros transformadores adjacentes operando em carregamento nominal, transitórios ou sobreensões podem ser induzidos nesses transformadores próximos. Esta situação é conhecida na literatura como energização solidária ou *sympathetic inrush*. As correntes de energização evidenciadas na energização solidária apresentam amplitudes superiores àquelas observadas quando ocorre a energização de um transformador que não opera em paralelo com os demais. Porém, ao contrário da energização simples de um transformador, nesse fenômeno não se verifica uma quantidade de componente de segunda harmônica suficiente para que haja bloqueio por restrição harmônica, podendo provocar incorretas atuações do sistema de proteção.

### 3.4.2 Sobreexcitação do Transformador

O fluxo magnético dentro do núcleo do transformador é diretamente proporcional à tensão aplicada em seus enrolamentos e inversamente proporcional à frequência de operação do sistema, conforme a equação (3.33). Condições de sobretensão ou subfrequência podem produzir níveis de fluxo que venham a saturar o núcleo do transformador, sobreexcitando-o, isto é, causando um aumento na corrente de excitação, além de provocar aquecimento, ruído e vibrações (GUZMAN et al., 2002).

Durante o fenômeno da sobreexcitação do transformador, a forma de onda do fluxo permanece simétrica, porém, atinge a região de saturação por iguais períodos em seus semiciclos positivo e negativo (HOROWITZ; PHADKE, 2008), contribuindo para o aparecimento de harmônicos ímpares de 3° e 5° ordem na forma de onda da corrente diferencial. Na prática, apenas o monitoramento da componente de quinta harmônica é utilizado na discriminação do fenômeno da sobreexcitação. A componente de terceira harmônica não costuma ser utilizada nas funções de bloqueio e de restrição, uma vez que é uma harmônica de sequência zero e é eliminada pela compensação delta do relé diferencial ou conexão delta dos TCs (SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC., b).

### 3.4.3 Saturação dos TCs

Assim como os transformadores de potência, os TCs contêm um material ferromagnético e estão sujeitos a saturação.

Em casos de faltas internas ou externas à zona de proteção do transformador, quando a corrente que passa pelo TC de proteção supera cerca de 20 vezes o valor da corrente nominal primária do transformador de potência, é possível que um dos TCs conectados aos enrolamentos do transformador de potência sature. O pior caso de saturação é produzido pelo efeito da componente DC presente na corrente de falta. Durante o período de saturação, as correntes secundárias dos TCs podem conter uma componente DC com decaimento exponencial, além de harmônicos pares e ímpares (GUZMAN et al., 2002). Se for considerada a existência de fluxo remanescente no núcleo do TC, pode-se ter distorções nas formas de onda das correntes secundárias destes dispositivos. A proteção pode atuar de forma incorreta durante esse período, desconectando o transformador e comprometendo a eficiência da proteção (BERNARDES, 2006).

Na Figura 3.14 são ilustradas as correntes  $i_{SA1}$ ,  $i_{SA2}$  e  $i_{DA}$  em um caso de uma falta externa próxima ao TC1, com saturação no TC1. A variável  $k_f$  corresponde à amostragem na qual a falta teve início. Neste caso, a corrente diferencial é totalmente distorcida, podendo vir a sensibilizar o relé de forma inadequada.

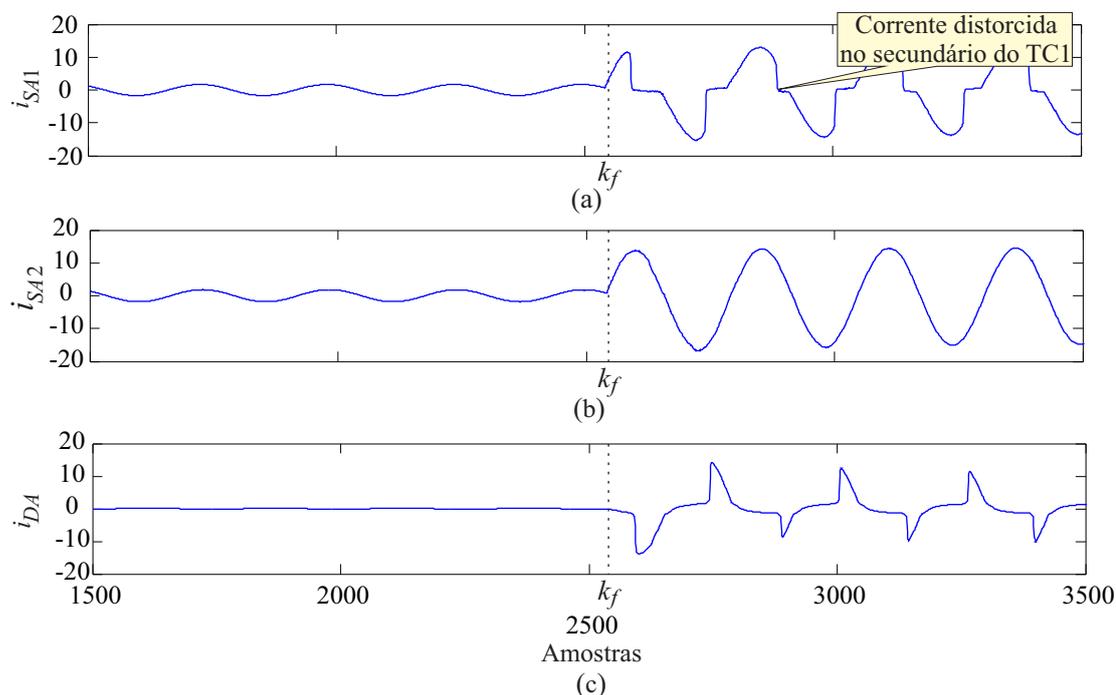


Figura 3.14: Correntes em um caso de saturação do TC1: a) Corrente secundária que flui pelo TC1; b) Corrente secundária que flui pelo TC2; c) Corrente diferencial de operação.

### 3.5 Resumo

A proteção diferencial é bastante utilizada em transformadores de potência, fornecendo um contínuo monitoramento de suas correntes primárias e secundárias. Este capítulo apresentou os principais conceitos e características desse tipo de proteção, destacando o estudo da proteção diferencial percentual. As características operacionais do relé diferencial percentual, bem como a sua dificuldade em operar corretamente face a uma série de fenômenos que provocam "falsas" correntes diferenciais também foram estudadas. Alguns desses fenômenos foram citados e explicados, como por exemplo, a presença das correntes de *inrush* durante a energização do transformador. Apresentou-se também neste capítulo a metodologia do relé diferencial com restrição por harmônicos e a sua implementação por meio do algoritmo de *Fourier* de um ciclo.

---

## Capítulo 4

# Fundamentos da Transformada *Wavelet*

---

Fenômenos transitórios que interferem na dinâmica de funcionamento dos transformadores de potência, como faltas externas, faltas internas, energização e remoção de faltas externas próximas apresentam, muitas vezes, componentes de alta frequência e de curta duração, cuja análise pode ser realizada por meio da transformada *wavelet* em vários níveis de resolução de tempo-frequência.

O conceito básico da transformada *wavelet* é derivado da transformada de *Haar*, proposta em 1910. Porém, apenas na década de 80 sua formulação matemática passou a existir. Nesta fase, passaram a se destacar as contribuições apresentadas em Daubechies (1992), na qual se iniciava o conceito da transformada *wavelet* discreta (TWD) e no trabalho de Mallat (1989), que desenvolveu o conceito de análise em multiresolução (AM). Uma variante da TWD, a transformada *wavelet* discreta redundante (TWDR) tem sido utilizada em alguns trabalhos, como em Costa e Driesen (2013) e em Costa (2014), apresentando melhor desempenho na detecção de transitórios em sistemas elétricos de potência que a versão anterior.

Apresenta-se neste capítulo a metodologia utilizada no cálculo recursivo dos coeficientes escala e *wavelet* por meio da TWDR, bem como no cálculo recursivo das suas energias para detecção de eventos transitórios relacionados à proteção dos transformadores. Apresenta-se também uma nova metodologia baseada nas *wavelets*, na qual o cálculo da energia dos coeficientes *wavelet* leva em consideração a influência dos coeficientes *wavelet* com efeitos de borda.

### 4.1 Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR)

De um modo geral, por meio da TWD, o espectro de frequência de um sinal discreto  $x(k)$ , com taxa de amostragem  $f_s$ , é dividido sucessivamente por meio de filtros passa-baixa  $g$  (filtro escala) e passa-alta  $h$  (filtro *wavelet*), dispostos em cada nível de resolução.

A TWDR, também conhecida como transformada *wavelet* estacionária (SWT, do inglês *Stationary Wavelet Transform*) também apresenta um algoritmo similar. Porém, ao contrário da TWD, a TWDR não realiza a operação de subamostragem por dois nas amostras do sinal, sendo uma transformada invariante no tempo aos deslocamentos circulares das amostras (NETO, 2013). Além disso, essa variante da TWD proporciona maior rapidez na detecção de distúrbios transitórios no sistema de potência e pode ser implementada de forma recursiva para aplicações em tempo real (COSTA; SOUZA, 2011). Portanto, apenas a TWDR é apresentada neste trabalho.

Na Figura 4.1 é ilustrado o processo de decomposição de um sinal arbitrário  $x$  nos coeficientes escala e *wavelet*, no qual as saídas do filtro  $\tilde{g}$  correspondem aos coeficientes escala  $s_1, s_2, \dots$ , que fornecem informações de baixa frequência do sinal, enquanto que as saídas do filtro  $\tilde{h}$  correspondem aos coeficientes *wavelet*  $w_1, w_2, \dots$ , que fornecem o conteúdo de alta frequência do sinal. Em cada nível de decomposição, os coeficientes escala podem ser entradas para um próximo banco de filtros escala e *wavelet*.

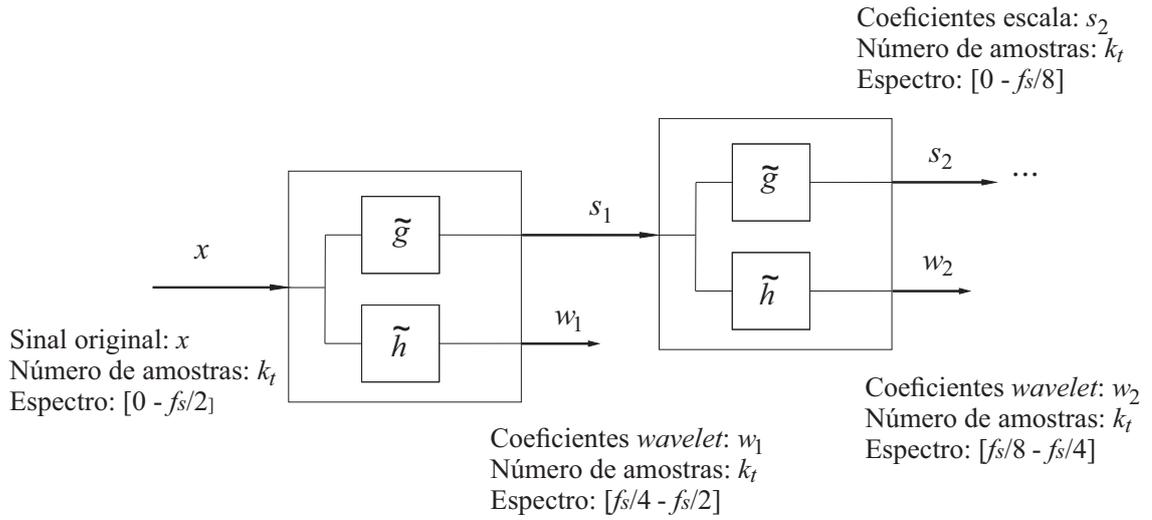


Figura 4.1: Diagrama de blocos para dois níveis de resolução da TWDR.

De acordo com Percival e Walden (2000), os coeficientes dos filtros escala  $\tilde{g}$  e *wavelet*  $\tilde{h}$  da TWDR são obtidos por meio dos correspondentes filtros  $g$  e  $h$  da TWD:

$$\tilde{h}(l) = \frac{h(l)}{\sqrt{2}}, \quad (4.1)$$

$$\tilde{g}(l) = \frac{g(l)}{\sqrt{2}}, \quad (4.2)$$

com  $l = 0, 1, \dots, L - 1$ , em que  $L$  corresponde ao número de coeficientes dos filtros escala

e *wavelet*.

Analogamente a TWD, os coeficientes escala  $s_j$  e os coeficientes *wavelet*  $w_j$ , no nível de resolução  $j$ , são obtidos pela convolução entre os coeficientes  $s_{j-1}$ , do nível de resolução  $j-1$ , com os filtros  $\tilde{g}$  e  $\tilde{h}$ :

$$s_j(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{g}_j(n-k)s_{j-1}, \quad (4.3)$$

$$w_j(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{h}_j(n-k)s_{j-1}, \quad (4.4)$$

sendo  $s_0$  igual ao sinal original. Na Figura 4.2 é ilustrado o processo de decomposição de um sinal de corrente com falta nos coeficientes escala e *wavelet*, na primeira escala da TWDR, utilizando-se a *wavelet* mãe da família *Daubechies* com 4 coeficientes (db(4)) e uma taxa de amostragem  $f_s = 15,36$  kHz.

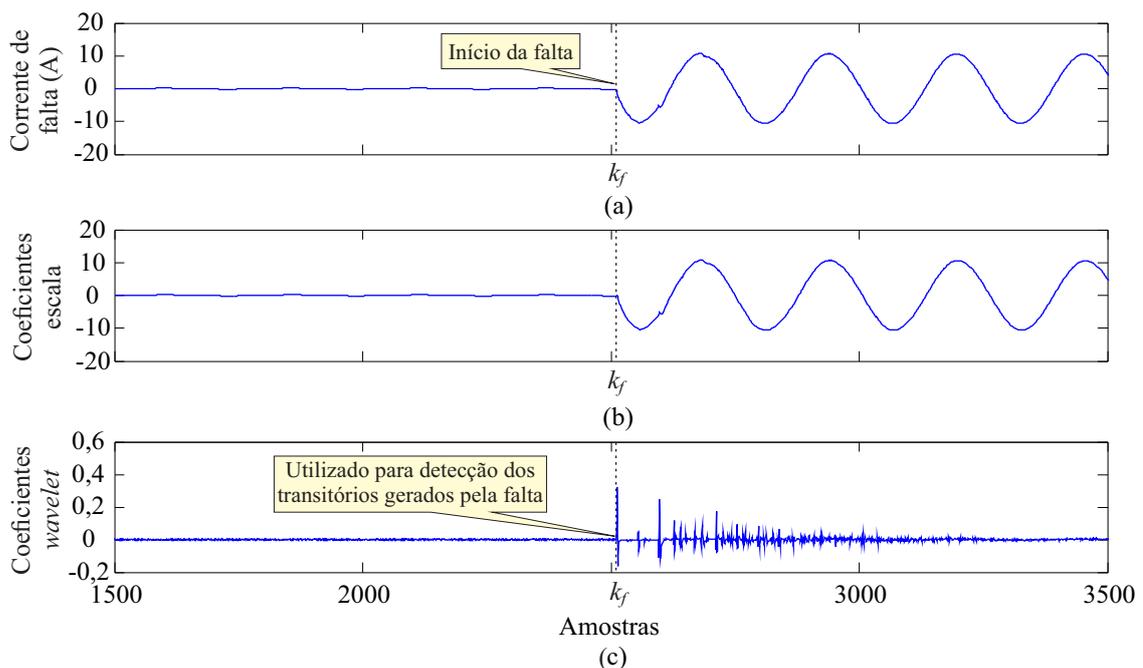


Figura 4.2: Decomposição de um sinal de corrente com falta na primeira escala da TWDR: a) Corrente de falta; b) Coeficientes escala; c) Coeficientes *wavelet*.

De acordo com a Figura 4.2, os coeficientes escala são influenciados pelas componentes de baixa frequência do sinal analisado, apresentando forma similar ao sinal original, cuja frequência dominante é uma componente de baixa frequência  $f = 60$  Hz, enquanto que os coeficientes *wavelet* são influenciados pelas componentes de alta frequência pre-

sentes nos primeiros ciclos após a falta, sendo bastante utilizados na detecção de transitórios de falta (COSTA, 2014).

Os filtros escala e *wavelet* da TWDR, da mesma forma que na TWD, são filtros espelhados em quadratura e seus coeficientes satisfazem as seguintes propriedades (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$\sum_{l=0}^{L-1} \tilde{g}(l) = 1, \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{g}^2(l) = \frac{1}{2}, \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \tilde{g}(l)\tilde{g}(l+n) = 0, \quad (4.5)$$

$$\sum_{l=0}^{L-1} \tilde{h}(l) = 0, \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{h}^2(l) = \frac{1}{2}, \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \tilde{h}(l)\tilde{h}(l+n) = 0, \quad (4.6)$$

$$\tilde{g}(l) = (-1)^l \tilde{h}(L-l-1), \quad (4.7)$$

$$\tilde{h}(l) = (-1)^l \tilde{g}(L-l-1), \quad (4.8)$$

com  $n \in \mathbb{N}$ , em que  $\mathbb{N}$  corresponde ao conjunto dos números naturais. Portanto, além dos filtros escala e *wavelet* serem ortogonais, as funções *wavelet* apresentam energia finita e média nula, enquanto que as funções escala apresentam energia finita e média unitária.

A função-base, ou *wavelet* mãe, utilizada determina os coeficientes dos filtros *wavelet* e escala. Para exemplificar, os coeficientes do filtro escala da *wavelet* mãe db(4), no qual  $L = 4$ , são (DAUBECHIES, 1992):

$$\tilde{g}(0) = \frac{1 + \sqrt{3}}{8}, \tilde{g}(1) = \frac{3 + \sqrt{3}}{8}, \tilde{g}(2) = \frac{3 - \sqrt{3}}{8}, \tilde{g}(3) = \frac{1 - \sqrt{3}}{8}. \quad (4.9)$$

Substituindo a equação (4.9) na equação (4.8), os coeficientes do filtro *wavelet* da db(4) são:

$$\tilde{h}(0) = \tilde{g}(3), \tilde{h}(1) = -\tilde{g}(2), \tilde{h}(2) = \tilde{g}(1), \tilde{h}(3) = -\tilde{g}(0). \quad (4.10)$$

Na Figura 4.1, os coeficientes escala  $s_1$  e *wavelet*  $w_1$  do primeiro nível de resolução possuem  $k_t$  amostras, que coincidem com a quantidade de amostras do sinal original  $x(n)$ , visto que não há a operação de subamostragem por dois. Dessa maneira,  $k_t$  pode ser um número inteiro ímpar ou par, sendo no mínimo igual ao número de coeficientes dos filtros. Isto é,  $k_t \geq L$ .

Didaticamente, o cálculo dos coeficientes  $s_1$  e  $w_1$  pode ser realizado matricialmente a partir do algoritmo piramidal da TWDR, como (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$s_1 = \tilde{A}_1 x, \quad (4.11)$$

$$w_1 = \tilde{B}_1 x, \quad (4.12)$$

em que  $\tilde{A}_1$  e  $\tilde{B}_1$  são matrizes quadradas cuja ordem é igual a  $k_t$ . As matrizes  $\tilde{A}_1$  e  $\tilde{B}_1$  são formadas a partir de deslocamentos circulares dos coeficientes dos filtros  $\tilde{g}$  e  $\tilde{h}$ , respectivamente. Dessa forma, as equações (4.11) e (4.12) podem ser reescritas como:

$$\begin{bmatrix} s_1(0) \\ s_1(1) \\ s_1(2) \\ s_1(3) \\ s_1(4) \\ \vdots \\ s_1(k_t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{g}(3) & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \tilde{g}(0) & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) \\ \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \tilde{g}(0) & \tilde{g}(1) \\ \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \tilde{g}(0) \\ \tilde{g}(0) & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{g}(0) & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \tilde{g}(0) & \tilde{g}(1) & \tilde{g}(2) & \tilde{g}(3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \\ \vdots \\ x(k_t) \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

$$\begin{bmatrix} w_1(0) \\ w_1(1) \\ w_1(2) \\ w_1(3) \\ w_1(4) \\ \vdots \\ w_1(k_t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{h}(3) & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \tilde{h}(0) & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) \\ \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \tilde{h}(0) & \tilde{h}(1) \\ \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \tilde{h}(0) \\ \tilde{h}(0) & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{h}(0) & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \tilde{h}(0) & \tilde{h}(1) & \tilde{h}(2) & \tilde{h}(3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \\ \vdots \\ x(k_t) \end{bmatrix}. \quad (4.14)$$

Conforme as equações (4.13) e (4.14), no primeiro nível de resolução e utilizando a db(4), os três primeiros coeficientes *wavelet* e escala são calculados a partir de amostras iniciais e finais do sinal. Portanto, é possível que esses coeficientes apresentem valores de amplitude diferenciados dos demais, caracterizando um fenômeno conhecido como efeito de borda. No primeiro nível de resolução, esse fenômeno é observado nos primeiros  $L - 1$  coeficientes *wavelet* e escala da TWDR.

#### 4.1.1 Energia dos coeficientes Escala e Wavelet

Segundo o teorema de Parseval, a energia espectral de um sinal  $x$  é dada pela soma da energia dos seus coeficientes *wavelet* nos diferentes níveis de resolução  $j \leq J$ , com a energia dos coeficientes escala no nível de resolução  $J$ , como segue: (BURRUS; GOPINATH; GUO, 1998).

$$\sum_{k=0}^{k_t-1} |x(k)|^2 = \sum_{k=0}^{k_t-1} |s_J(k)|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{k=0}^{k_t-1} |w_j(k)|^2, \quad (4.15)$$

em que:

$\sum_{k=0}^{k_r-1} |x(k)|^2$  - energia do sinal original,

$\sum_{k=0}^{k_r-1} |s_J(k)|^2$  - energia dos coeficientes escala do nível de resolução  $J$ ,

$\sum_{k=0}^{k_r-1} |w_j(k)|^2$  - energia dos coeficientes *wavelet* do nível de resolução  $j$ .

## 4.2 Algoritmo Recursivo para a TWDR

Em um algoritmo recursivo, o valor de um coeficiente  $w$  ou  $s$  na amostra corrente  $k$  é calculado com base nas amostras anteriores ou igual a  $k$ , o que o torna aplicável em tempo real. Baseado nas equações (4.13) e (4.14), em uma amostra corrente  $k$ , o cálculo recursivo dos coeficientes escala e *wavelet* da TWDR é realizado com as últimas amostras de  $x$ , como segue (COSTA; SOUZA; BRITO, 2010b):

$$s(k) = \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{g}(l)x(k+l-L+1), \quad (4.16)$$

$$w(k) = \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{h}(l)x(k+l-L+1), \quad (4.17)$$

desde que  $k \geq L$ . Desta forma, os coeficientes com efeito de borda  $\{w(0), w(1), \dots, w(L-1)\}$  ou  $\{s(0), s(1), \dots, s(L-1)\}$  por exemplo, vistos nas equações (4.13) e (4.14) não podem ser calculados recursivamente, ou em tempo real.

Recursivamente, o cálculo dos coeficientes *wavelet* e escala envolve  $L-1$  operações de adição e  $L$  operações de multiplicação, ao desprezar as multiplicações por zero. Em aplicações em tempo real, o tempo gasto para o cálculo de um coeficiente *wavelet* ou escala ( $t_w$ ) deve ser no máximo igual ao tempo equivalente ao tempo de amostragem ( $1/f_s$ ) do sinal original  $x$ , ou seja:

$$t_w \leq \frac{1}{f_s}, \quad (4.18)$$

### 4.2.1 Cálculo das Energias dos Coeficientes Escala e *Wavelet*

Transitórios em sistemas elétricos de potência, como faltas em transformadores, são caracterizados por apresentarem duração curta a partir de um instante de incidência, ou seja, apresentam energia concentrada em um curto intervalo de tempo. Nesse contexto, a equação (4.15) não se adequa à identificação da parcela de energia relacionada aos transitórios de falta, ao utilizar todo o sinal. Porém, as energias podem ser calculadas em um trecho específico dos coeficientes *wavelet* da TWDR, em uma escala  $j$ , entre as

amostras  $k_1$  e  $k_2$ , como segue:

$$E_j(k_1, k_2) = \sum_{k=k_1}^{k_2} |w_j(k)|^2, \quad (4.19)$$

em que  $0 \leq k_1 < k_2 \leq k_f$ .

A equação (4.19) é utilizada quando se quer analisar a energia dos coeficientes escala ou *wavelet* de um nível de resolução  $j$  em intervalos fixos (janelas). Para análise de distúrbios, as energias são calculadas para uma janela de  $\Delta k$  coeficientes, em que  $\Delta k$  normalmente corresponde ao número de amostras do sinal original em um ciclo ( $\Delta k = \frac{f_s}{f}$ ) (COSTA, 2010).

Recursivamente, no instante de amostragem  $k$ , as energias dos coeficientes escala e *wavelet*, no primeiro nível de resolução, podem ser calculadas como sendo:

$$\ddot{\epsilon}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+1}^k s^2(n), \quad (4.20)$$

$$\dot{\epsilon}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+1}^k w^2(n), \quad (4.21)$$

em que  $k \geq \Delta k$ ;  $\dot{\epsilon}$  corresponde à energia dos coeficientes *wavelet*, que está relacionada com a energia dos transitórios de alta frequência do sinal;  $\ddot{\epsilon}$  corresponde à energia dos coeficientes escala, que está relacionada com a energia das componentes de baixa frequência do sinal original.

### 4.3 Algoritmo Recursivo Para o a TWDR com Efeito de Borda

Na Figura 4.3 é ilustrado o processo recursivo para cálculo dos coeficientes *wavelet*  $w$  da TWDR usando a db(4). O sinal original é um sinal de corrente com transitórios, que foi amostrado à uma taxa  $f_s = 1200$  Hz e reproduzido para ser analisado em tempo real usando um DSP.

De acordo com a equação (4.17), os três primeiros coeficientes *wavelet* da janela principal não podem ser calculados em tempo real. Porém, os demais coeficientes *wavelet* foram calculados ao longo do tempo e correspondem às amostras da janela principal (Figura 4.3(b)).

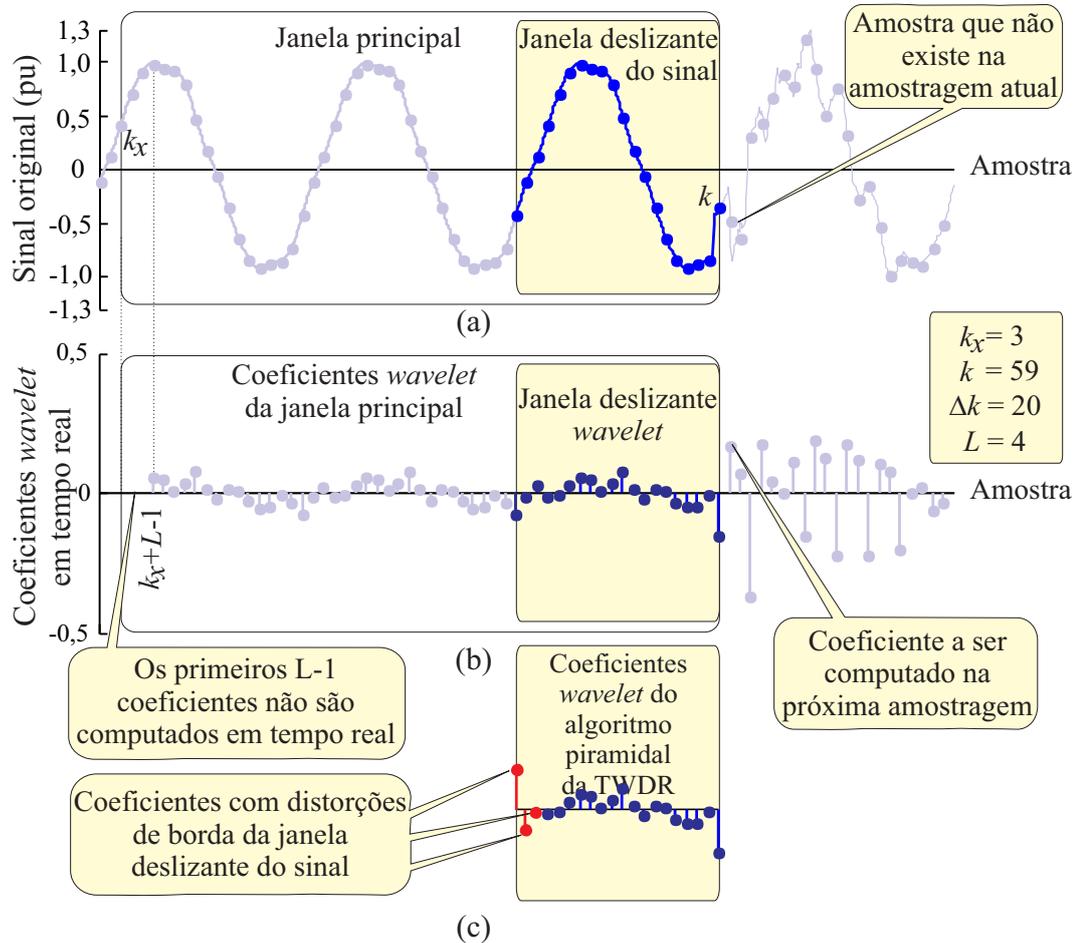


Figura 4.3: Cálculo dos coeficientes *wavelet* em tempo real: a) Sinal original; b) Coeficientes *wavelet* do algoritmo piramidal da TWDR; c) Coeficientes *wavelet* do algoritmo piramidal da TWDR relacionados à janela deslizante do sinal (COSTA, 2014).

Ao considerar uma janela deslizante de um ciclo, no sinal original (Figura 4.3(a)), tem-se que nem todos os coeficientes *wavelet* dentro da janela deslizante *wavelet* correspondem aos coeficientes da janela deslizante do sinal, uma vez que os efeitos de borda não são levados em consideração. Por exemplo, Na Figura 4.3(c), os coeficientes *wavelet* da janela deslizante mostrada na Figura 4.3(a) foram calculados *offline* por meio do algoritmo piramidal da TWDR. Os últimos  $\Delta k - L + 1$  coeficientes da janela deslizante *wavelet* (Figura 4.3(b)) e os calculados por meio do algoritmo piramidal (Figura 4.3(c)) são exatamente os mesmos, enquanto que os primeiros  $L - 1$  coeficientes das duas janelas são diferentes. Para associar corretamente a janela deslizante *wavelet* à janela deslizante do sinal, Costa (2014) propôs a inclusão dos primeiros  $L - 1$  coeficientes com bordas para o cálculo das energias, substituindo os primeiros  $L - 1$  coeficientes da janela deslizante

*wavelet*. Os coeficientes com bordas são calculados com as primeiras e últimas  $L - 1$  amostras da janela deslizante do sinal, como segue:

$$\tilde{s}(n) = \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{g}(l)\tilde{x}(n+l), \quad (4.22)$$

$$\tilde{w}(n) = \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{h}(l)\tilde{x}(n+l), \quad (4.23)$$

em que  $n = 0, 1, \dots, L - 2$  e  $\tilde{x} = \{\tilde{x}(0), \tilde{x}(1), \dots, \tilde{x}(2L - 3)\} = \{x(k - L + 2), x(k - L + 3), \dots, x(k), x(k - \Delta k + 1), \dots, x(k - \Delta k + L - 1)\}$ .

### 4.3.1 Cálculo das Energias dos Coeficientes Escala e *Wavelet* com Efeito de Borda

As energias calculadas por meio das equações (4.20) e (4.21) levam em consideração todos os coeficientes dentro da janela deslizante do sinal, desconsiderando os  $L - 1$  coeficientes com efeitos de borda. Portanto,  $\varepsilon \neq \dot{\varepsilon} + \ddot{\varepsilon}$ , e a condição de conservação da energia do teorema de Parseval não é atendida. Para atender a condição de preservação da energia espectral de um sinal, Costa (2014) propõe a decomposição da energia espectral de uma janela deslizante de um sinal ( $\varepsilon$ ), em termos da energia dos coeficientes escala ( $\varepsilon^s$ ) e da energia dos coeficientes *wavelet* ( $\varepsilon^w$ ), na primeira escala, como segue:

$$\varepsilon(k) = \varepsilon^s(k) + \varepsilon^w(k), \quad (4.24)$$

em que  $\varepsilon^s$  e  $\varepsilon^w$  são decompostas em:

$$\varepsilon^s(k) = \varepsilon^{sa}(k) + \varepsilon^{sb}(k), \quad (4.25)$$

$$\varepsilon^w(k) = \varepsilon^{wa}(k) + \varepsilon^{wb}(k), \quad (4.26)$$

para  $k > \Delta k - 1$ , em que  $k_x$  corresponde à primeira amostra da janela deslizante do sinal. O componente  $\varepsilon^{wa}$ , que é devido aos primeiros  $L - 1$  coeficientes *wavelet* com efeito de borda da janela deslizante, é calculado como:

$$\varepsilon^{wa}(k) = \sum_{n=0}^{L-1} \tilde{w}(n)^2, \quad (4.27)$$

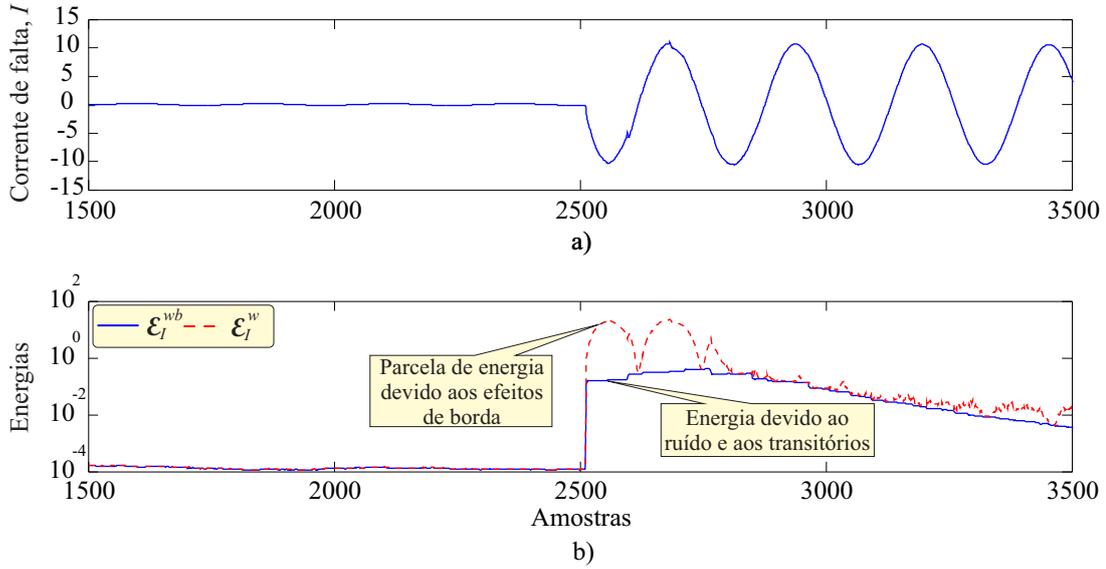


Figura 4.4: Energias calculadas para um sinal de corrente de falta.

para  $k > \Delta k - 1$ . O componente  $\epsilon^{wb}$  é calculado com os demais coeficientes *wavelet* da janela deslizando, os quais não apresentam efeitos de borda:

$$\epsilon^{wb}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+L}^k w(n)^2, \quad (4.28)$$

para  $k > \Delta k - 1$ . Similarmente,  $\epsilon^{sa}$  e  $\epsilon^{sb}$  são calculadas utilizando  $\tilde{s}$  e  $s$ , respectivamente.

Segundo Costa (2014), as formas de onda das energias  $\epsilon^{wb}$  e  $\epsilon^w$  são similares durante o regime permanente e durante as primeiras  $\Delta k - L + 1$  amostras de falta (aproximadamente um ciclo). Portanto, nessa dissertação, todas as discussões referidas à  $\epsilon^{wb}$  são válidas para  $\epsilon^w$  é proposto em outros trabalhos, tais como Silva, Souza e Brito (2006) e Costa, Souza e Brito (2010a).

Na Figura 4.4 é ilustrado o sinal de corrente de falta apresentado na Figura 4.2, assim como o comportamento de  $\epsilon^{wb}$  e  $\epsilon^w$ , calculadas, respectivamente, sem e com a consideração dos efeitos das bordas.

Conforme Costa (2014), a energia  $\epsilon^{wb} \approx \epsilon^w$  é influenciada pelos ruídos de alta frequência e transitórios, enquanto que  $\epsilon^w = \epsilon^{wa} + \epsilon^{wb}$  é influenciada tanto pelos ruídos e transitórios, quanto pelos efeitos de borda da janela deslizando. Durante o regime permanente, não se tem efeitos de borda para uma janela de um ciclo ( $\epsilon^{wa} \approx 0$ ) e  $\epsilon^w$  é influenciada apenas pelos ruídos de alta frequência, sendo  $\epsilon^w \approx \epsilon^{wb}$ . Contudo, a partir do início de uma falta, tem-se um rápido e acentuado crescimento de  $\epsilon^w$ , devido aos transitórios gerados pela falta e aos efeitos de borda, permitindo uma detecção mais rápida e confiável de

faltas que  $\epsilon^{wb}$  (COSTA, 2014).

Neste trabalho, as correntes que fluem pelo relé de proteção diferencial do transformador serão analisadas no domínio *wavelet* por meio das suas energias  $\epsilon^{wb}$  e  $\epsilon^w$ .

## 4.4 Resumo

Neste capítulo foi apresentada uma fundamentação teórica da TWDR e suas vantagens em relação à TWD. O cálculo dos coeficientes escala e *wavelet* da TWDR, bem como de suas respectivas energias, em tempo real, também foi elucidada. Apresentou-se ainda neste capítulo uma nova versão para o cálculo das energias dos coeficientes *wavelet*, baseada na influência dos coeficientes *wavelet* com bordas.

---

# Capítulo 5

## Método Proposto

---

Baseado no esquema da proteção diferencial convencional, apresenta-se neste capítulo o desenvolvimento de um algoritmo de proteção diferencial para transformadores de potência usando as energias dos coeficientes *wavelet* das correntes diferenciais de operação e restrição, que possa ser utilizado por um relé digital multifuncional com tempo de atuação inferior aos relés convencionais.

### 5.1 Projeto do Algoritmo de Proteção

Na Figura 5.1 apresenta-se o diagrama unifilar de blocos simplificado do algoritmo de proteção proposto, o qual é executado a cada passo de amostragem. A primeira operação realizada é similar ao de um algoritmo de proteção diferencial convencional e consiste no cálculo das correntes diferenciais trifásicas de operação  $i_D$  e restrição  $i_R$ , obtidas por meio das correntes dos secundários  $i_S$  dos transformadores de corrente conectados aos enrolamentos primário e secundário do transformador de potência. Na fase A, têm-se:

$$i_{DA(k)} = i_{SA1(k)} - i_{SA2(k)}, \quad (5.1)$$

$$i_{RA(k)} = \frac{i_{SA1(k)} + i_{SA2(k)}}{2}, \quad (5.2)$$

sendo  $k$  referente ao índice da amostra atual; o índice  $A$  é substituído pelos índices  $B$  e  $C$  para as fases  $B$  e  $C$ , respectivamente; os índices 1 e 2 indicam correntes provenientes dos enrolamentos primário e secundário do transformador de potência. O condicionamento das correntes  $i_{S1}$  e  $i_{S2}$  é feito por meio de filtros anti-aliasing e processos de conversão analógico-digital.

O processamento digital é feito pelo bloco TWDR, no qual os coeficientes *wavelet* são calculados, seguido pelo cálculo das energias dos coeficientes *wavelet* ( $\epsilon_{DA}$ ,  $\epsilon_{DB}$ ,  $\epsilon_{DC}$ ,  $\epsilon_{RA}$ ,  $\epsilon_{RB}$  e  $\epsilon_{RC}$ ) das correntes de operação ( $i_{DA}$ ,  $i_{DB}$  e  $i_{DC}$ ), e das correntes de restrição

( $i_{RA}$ ,  $i_{RB}$  e  $i_{RC}$ ). As energias podem ser as versões com e sem bordas.

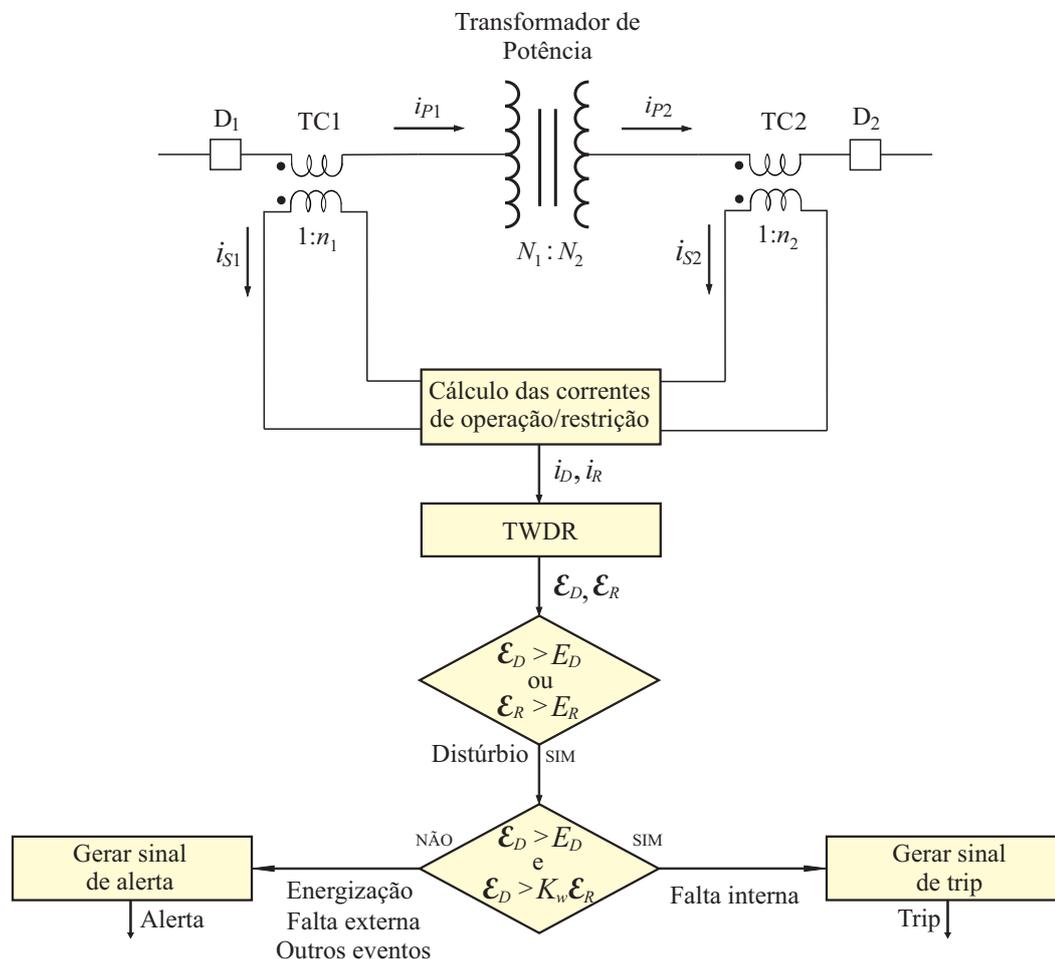


Figura 5.1: Algoritmo de proteção diferencial *wavelet* proposto.

De acordo com a Figura 5.1, os sinais de saída do bloco TWDR são entradas para duas sub-rotinas operacionais existentes na arquitetura do relé proposto: detecção de distúrbios e detecção de faltas internas, as quais serão descritas a seguir.

### 5.1.1 Detecção de Distúrbios

As energias dos coeficientes *wavelet* das correntes de operação  $\epsilon_D$  e das correntes de restrição  $\epsilon_R$ , em regime permanente, são afetadas por ruídos de alta frequência, apresentando valor muito baixo e aproximadamente constante. Contudo, um aumento dessas energias indica que o sistema está sujeito a alguma condição de distúrbio ou operação de chaveamento, como faltas externas, faltas internas e condições de energização.

Nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 são ilustradas, respectivamente, as correntes  $i_D$  e  $i_R$  em ampère, as suas energias de operação e de restrição calculadas sem a consideração do efeito de borda ( $\epsilon_D^{wb}$  e  $\epsilon_R^{wb}$ , respectivamente) e as suas energias de operação e de restrição calculadas com a presença do efeito de borda ( $\epsilon_D^w$  e  $\epsilon_R^w$ , respectivamente), para os casos de energização, falta externa e falta interna ao transformador. De acordo com as Figuras 5.2, 5.3 e 5.4, em cada caso analisado, durante o distúrbio, existe um aumento considerável e praticamente instantâneo das energias  $\epsilon_D$  e/ou  $\epsilon_R$ , o que as tornam ótimas candidatas para rápida detecção de distúrbios.

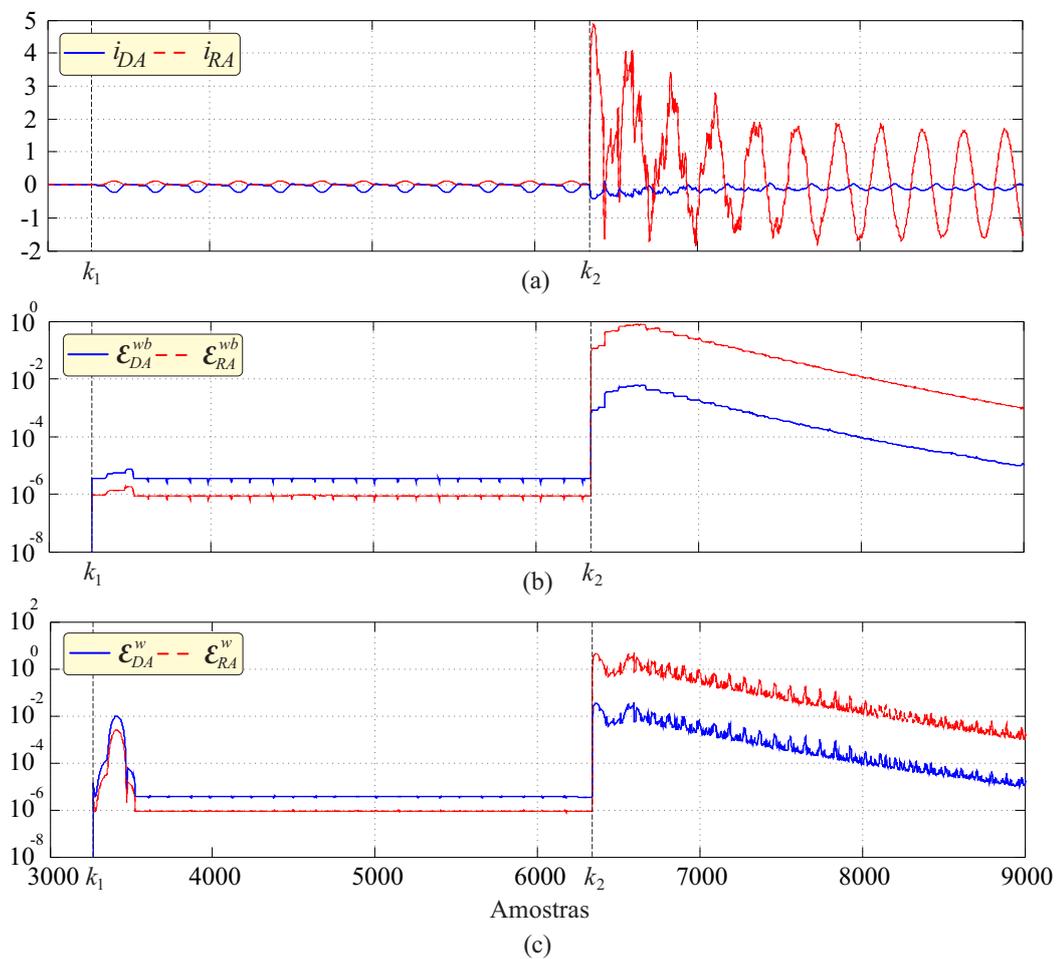


Figura 5.2: Energização do transformador: a) Correntes de operação e restrição; b)  $\epsilon_D^{wb}$  e  $\epsilon_R^{wb}$ ; c)  $\epsilon_D^w$  e  $\epsilon_R^w$ .

De acordo com a Figura 5.2, na energização do transformador,  $k_1$  e  $k_2$  correspondem, respectivamente, aos instantes de amostragem em que os disjuntores dos lados de baixa e alta tensão conectaram o transformador à rede elétrica.

Para detectar a ocorrência de distúrbios, as energias de operação  $\epsilon_D$  e de restrição  $\epsilon_R$ ,

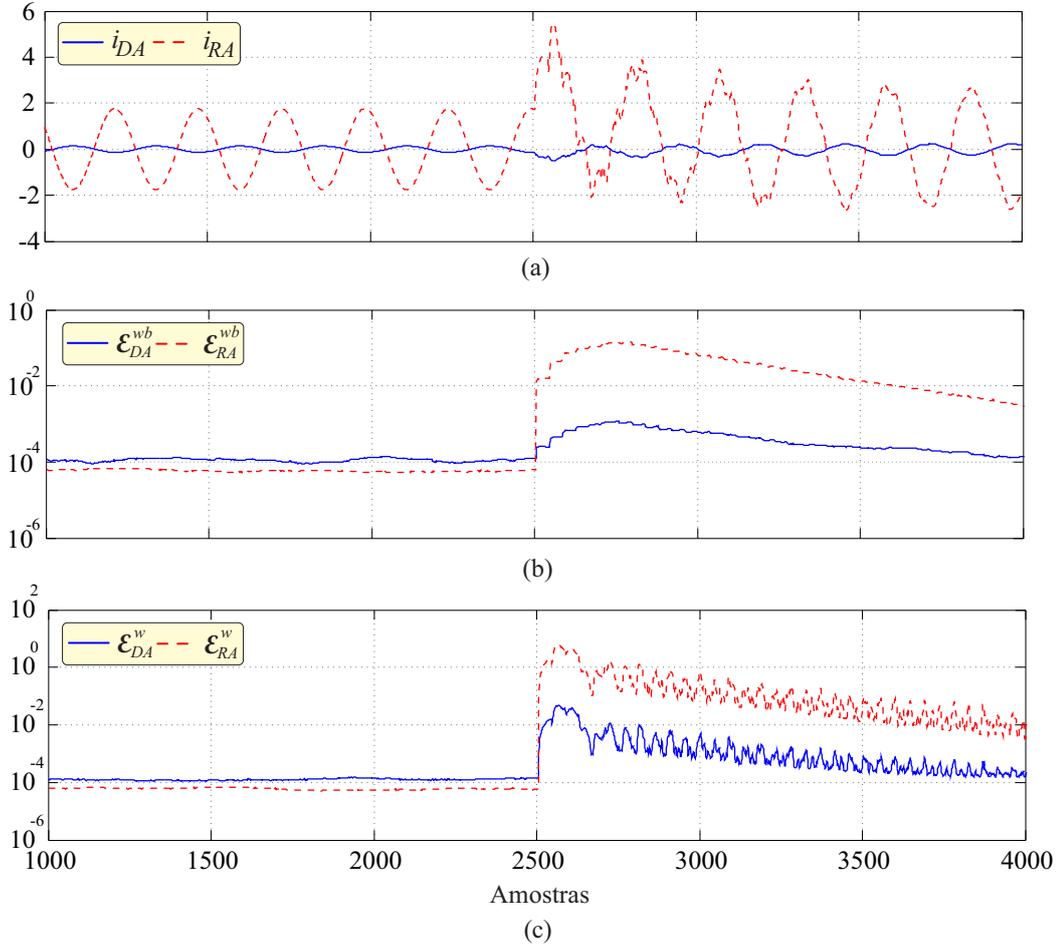


Figura 5.3: Falta externa: a) Correntes de operação e restrição; b)  $\epsilon_D^{wb}$  e  $\epsilon_R^{wb}$ ; c)  $\epsilon_D^w$  e  $\epsilon_R^w$ .

calculadas a cada instante, são comparadas a limiares  $E_D$  e  $E_R$ , respectivamente.

### Definição dos Limiares para as Energias de Operação e de Restrição

Em regime permanente, os coeficientes *wavelet* de sinais provenientes do sistema elétrico apresentam distribuição gaussiana com média  $\mu_w = 0$  e desvio padrão  $\sigma_w$  (COSTA; SOUZA, 2011). Desta forma, os coeficientes *wavelet* podem ser usados para detecção de distúrbios por meio de limiares estabelecidos em função do desvio padrão  $\sigma_w$ . Sejam os coeficientes *wavelet* em um intervalo de  $k_1$  a  $k_2$   $\{w(k_1), w(k_1 + 1), \dots, w(k_2)\}$  variáveis aleatórias independentes e normalmente distribuídas, com média  $\mu_w$  nula e variância  $\sigma_w^2$  (MONTGOMERY et al., 2006). Então, a variável aleatória

$$\epsilon = \sum_{n=k_1}^{k_2} w^2(n) \quad (5.3)$$

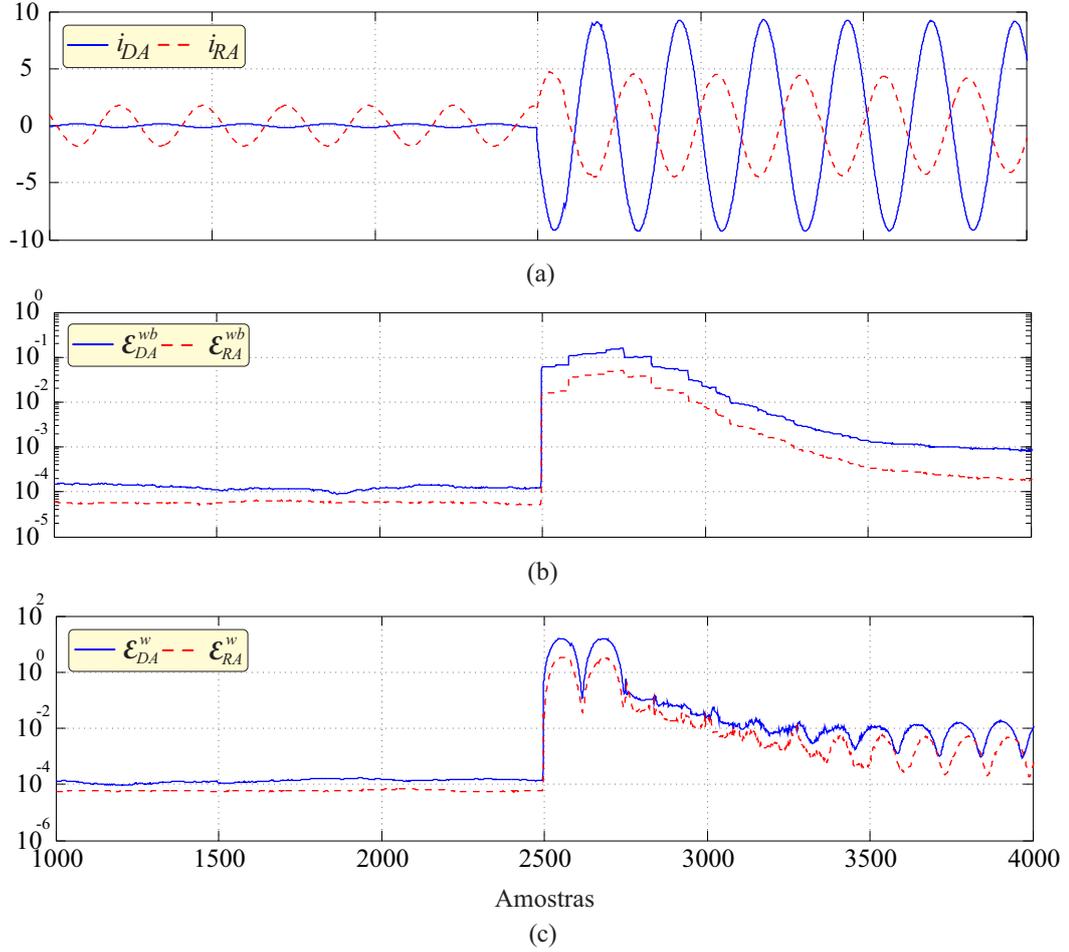


Figura 5.4: Falta interna: a) Correntes de operação e restrição; b)  $\epsilon_D^{wb}$  e  $\epsilon_R^{wb}$ ; c)  $\epsilon_D^w$  e  $\epsilon_R^w$ .

segue a distribuição qui-quadrado com  $k_2 - k_1 + 1$  graus de liberdade, média  $\mu_\epsilon = \epsilon$  e variância  $\sigma_\epsilon^2 = 2\mu_\epsilon$ . Portanto, as energias dos coeficientes *wavelet*, na amostra  $k$ , calculadas com as últimas amostras em uma janela de  $\Delta k - L + 1$  amostras, tal como definida para equação (4.28):

$$\epsilon^{wb}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+L}^k w^2(n), \quad (5.4)$$

também seguem uma distribuição qui-quadrado com  $\Delta k - L + 1$  graus de liberdade, média  $\mu_\epsilon(k) = \epsilon^{wb}(k)$  e variância  $\sigma_\epsilon^2(k) = 2\epsilon^{wb}(k)$ .

De acordo com o Teorema da Aditividade do Qui-Quadrado, a soma de variáveis aleatórias com distribuição qui-quadrado apresenta também uma distribuição qui-quadrado (MONTGOMERY et al., 2006). Considerando que cada elemento do vetor representativo das energias de operação, em regime permanente, no intervalo de  $k_1$  a  $k_2$ , corresponda a uma distribuição qui-quadrada, com valores de média  $\{\mu_\epsilon(k_1), \mu_\epsilon(k_1 + 1), \dots, \mu_\epsilon(k_2)\}$  e

variância  $\{\sigma_{\varepsilon}^2(k_1), \sigma_{\varepsilon}^2(k_1 + 1), \dots, \sigma_{\varepsilon}^2(k_2)\}$ , então a soma das energias  $\sum_{k=k_1}^{k_2} \varepsilon^{wb}(k)$  forma uma distribuição de probabilidade com média  $\bar{\mu}_{\varepsilon}$  e variância  $\bar{\sigma}_{\varepsilon}^2$  dadas por:

$$\bar{\mu}_{\varepsilon} = \frac{1}{k_2 - k_1 + 1} \sum_{n=k_1}^{k_2} \mu_{\varepsilon}(n) = \frac{1}{k_2 - k_1 + 1} \sum_{n=k_1}^{k_2} \varepsilon^{wb}(n), \quad (5.5)$$

$$\bar{\sigma}_{\varepsilon}^2 = 2\bar{\mu}_{\varepsilon}. \quad (5.6)$$

Das equações (5.5) e (5.6), tem-se ainda que:

$$\bar{\mu}_{\varepsilon} = \frac{1}{k_2 - k_1 + 1} \sum_{n=k_1}^{k_2} \sum_{m=n-\Delta k+1}^n w^2(m). \quad (5.7)$$

Em uma análise em tempo real, na qual se é pretendido realizar o mínimo esforço computacional possível,  $\bar{\mu}_{\varepsilon}$  pode ser calculado ao longo de todo o intervalo  $[k_1, k_2]$ , no regime permanente, como segue:

$$\bar{\mu}_{\varepsilon} = \begin{cases} 0, & \text{para } k = k_1 - 1 \\ \bar{\mu}_{\varepsilon} + \varepsilon^{wb}(k), & \text{para } k_1 \leq k < k_2 \\ \frac{\bar{\mu}_{\varepsilon} + \varepsilon^{wb}(k)}{k_2 - k_1 + 1}, & \text{para } k = k_2. \end{cases} \quad (5.8)$$

Portanto, o esforço computacional para calcular  $\bar{\mu}_{\varepsilon}$  é equivalente a uma operação de adição, por amostra, para  $k_1 \leq k < k_2$  e duas operações de adição e uma operação de divisão na amostra  $k_2$ .

Baseado no Teorema da Aditividade do Qui-Quadrado, o limiar  $E$  foi definido como função dos parâmetros  $\bar{\mu}_{\varepsilon}$  e  $\bar{\sigma}_{\varepsilon}^2$ , de maneira que  $\varepsilon^{wb}(k) < E$  no regime permanente, como segue:

$$E = \bar{\mu}_{\varepsilon} + \frac{1}{2}\bar{\sigma}_{\varepsilon}^2 = 2\bar{\mu}_{\varepsilon}. \quad (5.9)$$

Este procedimento também é válido para a componente de energia de restrição. Desta forma, das equações (5.5) e (5.9), tem-se:

$$E_D = \frac{2}{k_2 - k_1 + 1} \sum_{n=k_1}^{k_2} \varepsilon_D^{wb}(n), \quad (5.10)$$

$$E_R = \frac{2}{k_2 - k_1 + 1} \sum_{n=k_1}^{k_2} \varepsilon_R^{wb}(n). \quad (5.11)$$

Como  $\varepsilon^w \approx \varepsilon^{wb}$  durante o regime permanente (COSTA, 2014), visto que não há efeito de

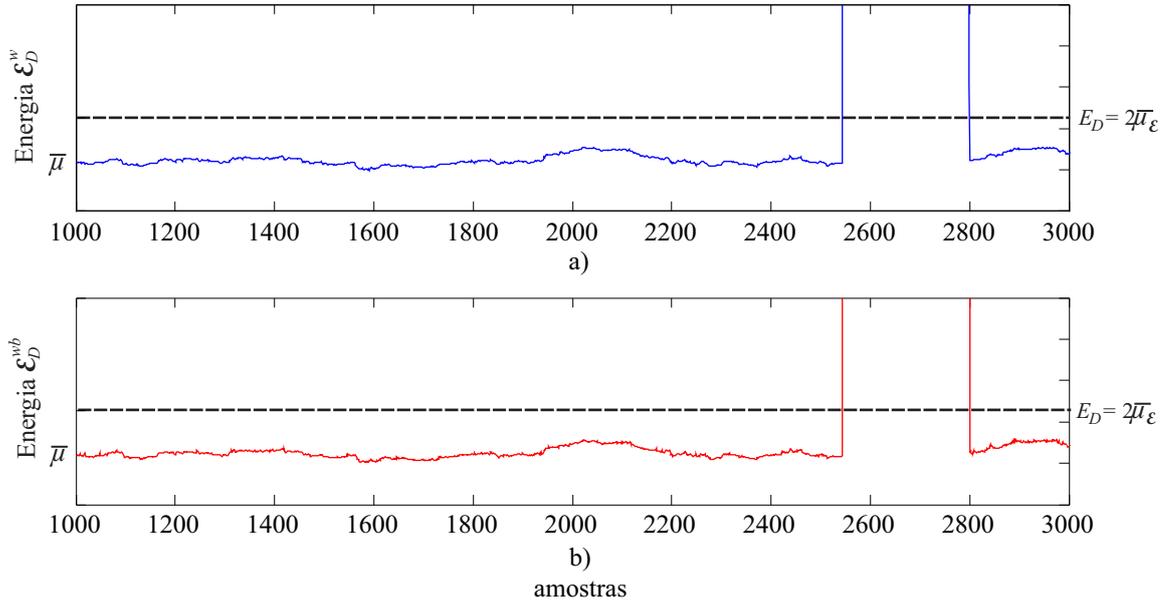


Figura 5.5: Definição dos limiares  $E_D$  para as energias de operação: a)  $\epsilon_D^{wb}$ ; b)  $\epsilon_D^w$ .

borda, então  $\epsilon^w$  e  $\epsilon^{wb}$  apresentam os mesmos limiares  $E_D$  e  $E_R$ . Os distúrbios transitórios são detectados com as energias  $\epsilon_D^{wb}$  e  $\epsilon_D^w$  por meio dos respectivos limiares  $E_D$  e  $E_R$  quando:

$$\epsilon_D > E_D, \quad (5.12)$$

$$\epsilon_R > E_R, \quad (5.13)$$

para ambas as energias sem e com os efeitos de borda.

Na Figura 5.5 é ilustrado o comportamento de  $\epsilon_D^{wb}$  e  $\epsilon_D^w$ , respectivamente, durante o regime permanente e após a ocorrência de uma falta interna no transformador, no qual  $\epsilon_D^w(k) \approx \epsilon_D^{wb}(k) < E_D$  para  $k < k_f$ . O evento é detectado quando se tem  $\epsilon_D^w(k) \neq \epsilon_D^{wb}(k) > E_D$ .

### 5.1.2 Detecção de Falhas Internas

Após a ocorrência de um distúrbio (falta interna, falta externa, energização, etc), quando se tem  $\epsilon_D > E_D$  ou  $\epsilon_R > E_R$  (Figura 5.1), propõe-se neste trabalho que as energias dos coeficientes *wavelet* das correntes diferenciais de operação e restrição sejam avaliadas de forma similar à metodologia da proteção diferencial percentual, conforme as equações (3.10) e (3.11), para discriminação de faltas internas dos demais distúrbios. Portanto, o algoritmo de decisão do relé proposto detecta uma falta interna se as duas seguintes

equações forem verdadeiras simultaneamente:

$$\varepsilon_D > E_D, \quad (5.14)$$

$$\varepsilon_D > K_w \varepsilon_R, \quad (5.15)$$

em que  $K_w$  corresponde à inclinação das curvas características tal como ilustrado na Figura 5.6, que distingue as regiões de operação das regiões de restrição. Estas equações são válidas para ambas as energias sem e com bordas ( $\varepsilon^{wb}$  e  $\varepsilon^w$ ), com os respectivos valores de  $E_D$  e  $K_w$ .

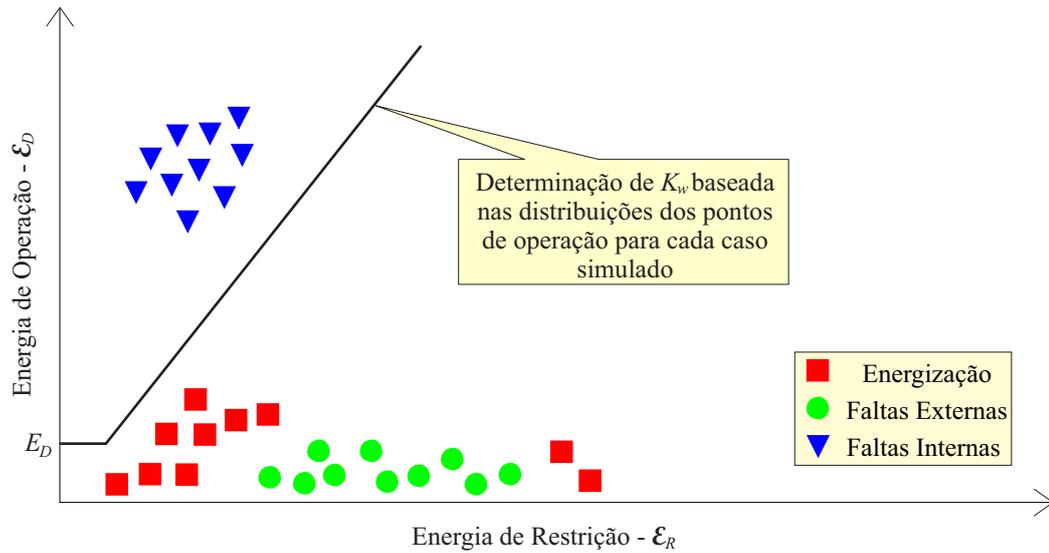
Similarmente ao método convencional, que foi definido pelas equações (3.10) e (3.11), e cujo princípio estudado nesse trabalho se baseia na influência das componentes de baixa frequência, tais como a componente fundamental e algumas harmônicas, o método proposto se baseia nas equações (5.14) e (5.15). Porém, aplicadas às componentes de altas frequência, em que as informações geradas pelos transitórios das correntes de operação e restrição são extraídas por meio das energias dos coeficientes *wavelet*. Desta forma, espera-se uma proteção diferencial mais rápida.

Quando uma falta interna é detectada, o algoritmo ativa uma variável binária  $Trip = 1$ , indicando a atuação da proteção para futuras implementações de relés *wavelet*. Quando o evento não se refere a uma falta interna, entretanto, o algoritmo ativa uma variável binária  $Alerta = 1$ , indicando que o relé tem o conhecimento da ocorrência de algum outro evento, a exemplo de uma falta externa.

## 5.2 Procedimento para Determinação da Região de Operação do Relé *Wavelet*

As seguintes etapas descrevem o procedimento sugerido neste trabalho para determinação da inclinação da curva característica  $K_w$ :

- Simulação de faltas externas, energizações e faltas internas;
- Estimção de  $E_D$  conforme equação (5.10);
- Distribuição, em um gráfico  $\varepsilon_D \times \varepsilon_R$ , dos pontos de operação ( $\varepsilon_R, \varepsilon_D$ ) para cada caso simulado, referente apenas ao ponto de operação mais relevante, isto é, o maior valor de inclinação  $\varepsilon_D/\varepsilon_R$  em um pequeno intervalo de amostras pós-distúrbio, conforme ilustrado na Figura 5.6;
- Seleção de  $K_w$  baseada no perfil de distribuição dos pontos de operação ( $\varepsilon_R, \varepsilon_D$ ), de modo a separar faltas internas dos demais eventos da melhor maneira possível.

Figura 5.6: Determinação da inclinação  $K_w$ .

### 5.3 Resumo

Neste capítulo foi apresentada a metodologia proposta para o esquema de proteção diferencial *wavelet*, baseada na energia dos coeficientes *wavelet* das correntes de operação e restrição. Foi apresentado também o procedimento segundo o qual são calculados os parâmetros das curvas características de atuação, tanto para o caso do cálculo das energias dos coeficientes *wavelet* sem a consideração dos efeitos de borda, quanto para o caso do cálculo das energias considerando os efeitos de borda.

---

# Capítulo 6

## Resultados Obtidos

---

Neste capítulo serão apresentados a metodologia de projeto para a proteção diferencial *wavelet* baseada no cálculo das energias de operação e de restrição, os resultados obtidos por meio de simulações de casos de energização do transformador, faltas externas e faltas internas e comparações de desempenho com o método convencional baseado no princípio de restrição por harmônicos.

### 6.1 Descrição do Sistema Elétrico Implementado

Na Figura 6.1 é apresentado o diagrama unifilar do sistema elétrico de 230 kV proposto por IEEE Power System Relaying Committee (2004) para avaliação dos esquemas de proteção, modelado usando o ATP.

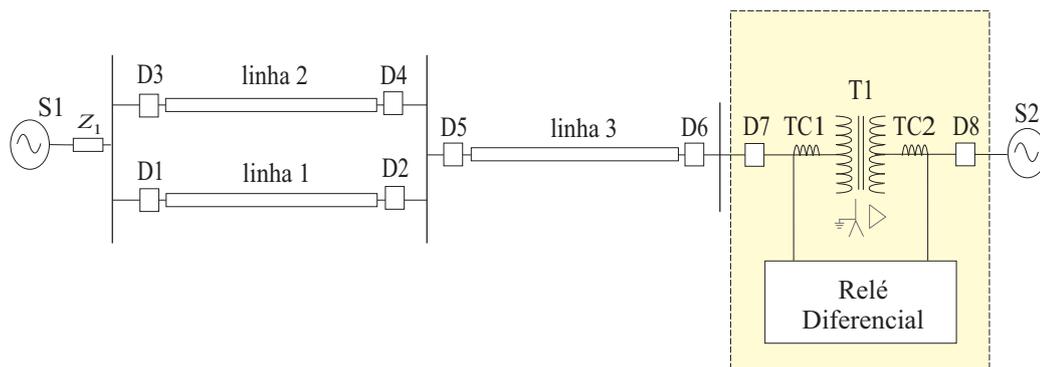


Figura 6.1: Diagrama unifilar do sistema elétrico.

A região hachurada na Figura 6.1 compreende os elementos necessários ao esquema de proteção do transformador: transformador de potência (T1), transformadores de corrente (TC1, conectado ao primário de T1 e TC2, conectado ao secundário de T1), disjun-

tores (D7 e D8) e relé diferencial *wavelet*. O relé diferencial não foi modelado no ATP, sendo a proteção diferencial avaliada com as correntes dos TCs no ambiente Matlab.

### 6.1.1 Transformador de Potência

Neste trabalho, o transformador de potência de 750 MVA foi modelado a partir do modelo saturável do ATP, composto pelo modelo do transformador real: transformador ideal, perdas nos enrolamentos (resistências e indutâncias de dispersão) e ramo não linear (perdas no núcleo) (Figura 3.2). Os parâmetros utilizados para a modelagem do transformador de potência, segundo IEEE Power System Relaying Committee (2004), são detalhados na Tabela 6.1.

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

Parâmetros	Símbolo	Valor	Unidade
Potência aparente	$S$	725	MVA
Tensão primária de fase	$V_1$	132,792	kV
Tensão secundária de fase	$V_2$	23	kV
Resistência de magnetização	$R_m$	1115	$\Omega$
Perdas no núcleo	$P_m$	466,303	kW
Resistência do primário	$R_1$	0,1469	$\Omega$
Reatância de dispersão do primário	$X_1$	6,7185	$\Omega$
Resistência do secundário	$R_2$	0,0044	$\Omega$
Reatância de dispersão do secundário	$X_2$	0,0656	$\Omega$

A modelagem do indutor não linear, isto é, a característica de saturação, foi expressa com base em um modelo de um transformador de 750 MVA típico, conforme descrito em Neves (1994). A curva de saturação do transformador de potência é ilustrada na Figura 6.2.

### 6.1.2 Transformadores de Corrente

O modo com o qual os enrolamentos de um transformador de potência são conectados implica uma defasagem angular entre as correntes nos seus lados primário e secundário, que pode provocar correntes diferenciais significativas nos enrolamentos secundários dos TCs. A instalação dos TCs de maneira inversa às ligações do transformador de potência corrige esse problema (OLIVEIRA, 2009). Por exemplo, um transformador de potência cujos enrolamentos são conectados na configuração  $\Delta Y$  e cuja relação de transformação seja  $N_1:N_2$  requer dois transformadores de corrente com secundários em configurações  $Y$  e  $\Delta$ , respectivamente, para compensação da defasagem angular. Para compensação de

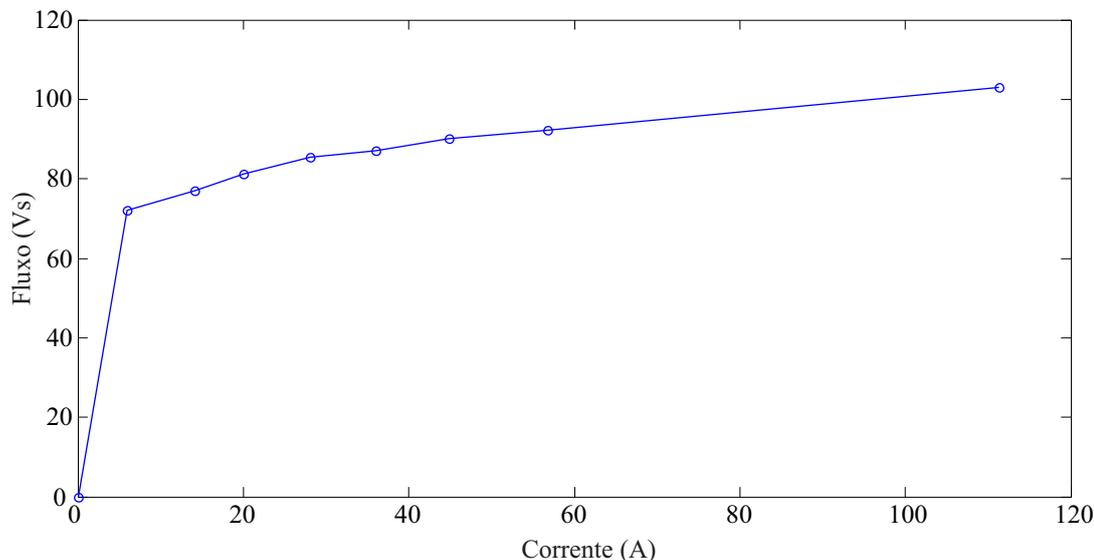


Figura 6.2: Curva de saturação para o transformador de potência.

amplitude, os TCs devem apresentar relações de transformação  $1:n_1$  e  $1:n_2$ , conforme expresso na equação (3.7). Portanto, neste trabalho, TCs com relações de transformação 1500:5 e 8000:5 foram instalados nos lados primário e secundário do transformador de potência, respectivamente, aproximando-se da condição expressa na equação (3.7) para o transformador de potência utilizado. Nas simulações realizadas, o transformador não operou à plena carga.

Apesar dos TCs serem configurados para compensação de ângulo e fase do transformador de potência neste trabalho, a compensação de fase, os níveis de tensão, as relações de transformação dos TCs e a filtragem da corrente de sequência zero podem ser programados no próprio *software* dos relés de proteção numéricos, de modo a compensar a corrente diferencial medida (ABB, 1999).

## 6.2 Definição da Curva Característica para Proteção Diferencial Percentual com Restrição por Harmônicos

Para comparação de desempenho com a metodologia de proteção proposta nessa dissertação, o método de proteção diferencial de transformadores baseado no princípio de restrição por harmônicos foi desenvolvido utilizando o algoritmo de *Fourier* de um ciclo com uma janela de 16 amostras (taxa de amostragem de  $f_s = 960$  Hz), sendo sua curva

característica definida por:

$$I_{OP} > \begin{cases} I_{PU}, \\ KI_{RT} + (K_2I_2 + K_5I_5), \end{cases} \quad (6.1)$$

em que  $I_{PU}$  foi considerado como sendo o valor máximo de pico de  $I_{OP}$  em regime permanente. Com base nas simulações realizadas e nos trabalhos de Einvall e Linders (1975) e Tavares e Silva (2012), as constantes  $K$ ,  $K_2$ , e  $K_5$  foram definidas como sendo:

$$K = 0,1, \quad (6.2)$$

$$K_2 = \frac{1}{0,15}, \quad (6.3)$$

$$K_5 = \frac{1}{0,35}. \quad (6.4)$$

### 6.3 Estimação da Inclinação da Curva Característica para Proteção Diferencial *Wavelet*

Para definir a fronteira de operação da proteção diferencial *wavelet*, indicada pelo parâmetro  $K_w$ , uma base de dados (Base 1), envolvendo registros de faltas internas, faltas externas na linha 3 e energizações no transformador foi gerada no ATP, variando-se randomicamente os seguintes parâmetros: ângulo de inserção de falta ( $\theta$ ), resistência de falta ( $r_f$ ), distância do local da falta ao transformador ( $d_f$ ) e tipo de falta, para os casos de faltas externas; ângulo de inserção de falta, resistência de falta e tipo de falta, para os casos de faltas internas; ângulo de incidência da tensão para os casos de energização do transformador (Tabela 6.2). A variável  $\theta$  corresponde ao ângulo da tensão da fase A.

Tabela 6.2: Base de dados para obtenção da curva do método *wavelet* proposto.

Parâmetros	Faltas Externas	Faltas Internas	Energização
$0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$	✓	✓	✓
$1 \Omega \leq r_f \leq 100 \Omega$	✓	✓	-
$20 \text{ km} \leq d_f \leq 380 \text{ km}$	✓	-	-
Tipo da falta (AT, AB, ABT, ABC)	✓	✓	-
Número de casos	1000	1000	75

Nas Figuras 6.3 - 6.5 são apresentados os pontos de operação ( $\epsilon_R^{wb}$ ,  $\epsilon_D^{wb}$ ) e ( $\epsilon_R^w$ ,  $\epsilon_D^w$ ),

para os casos de energização, faltas externas e faltas internas. Em cada caso, apenas o ponto mais relevante em um intervalo de 1/8 ciclo pós-distúrbio foi plotado, uma vez que esquemas de proteção *wavelets* devem atuar nas primeiras amostras pós-distúrbio.

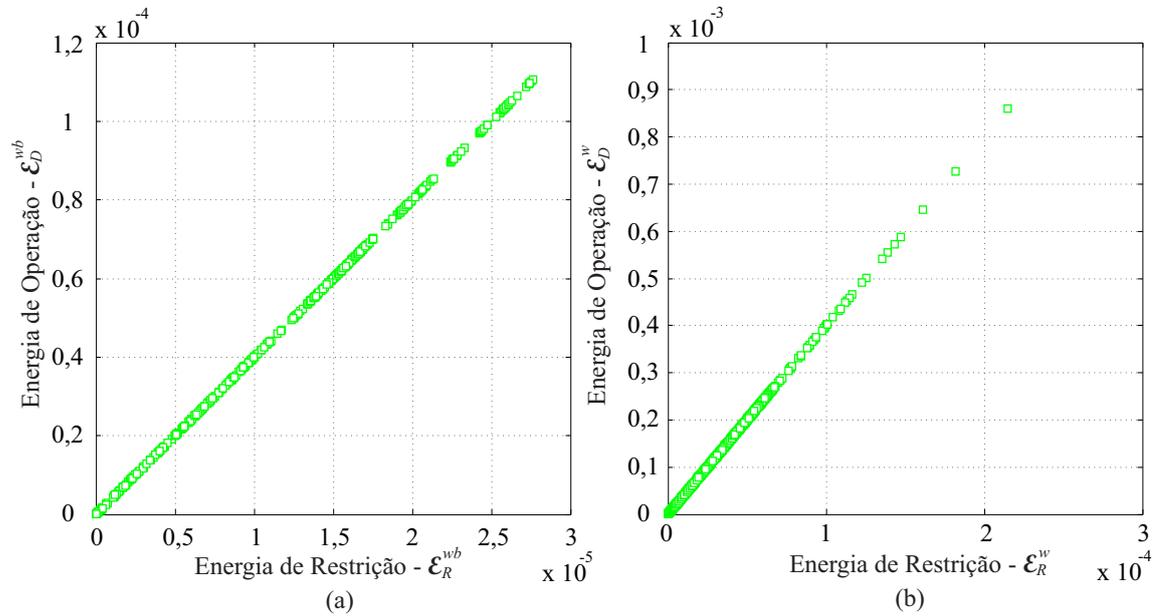


Figura 6.3: Pontos de operação para os casos de energização do transformador: a)  $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$ ; b)  $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$ .

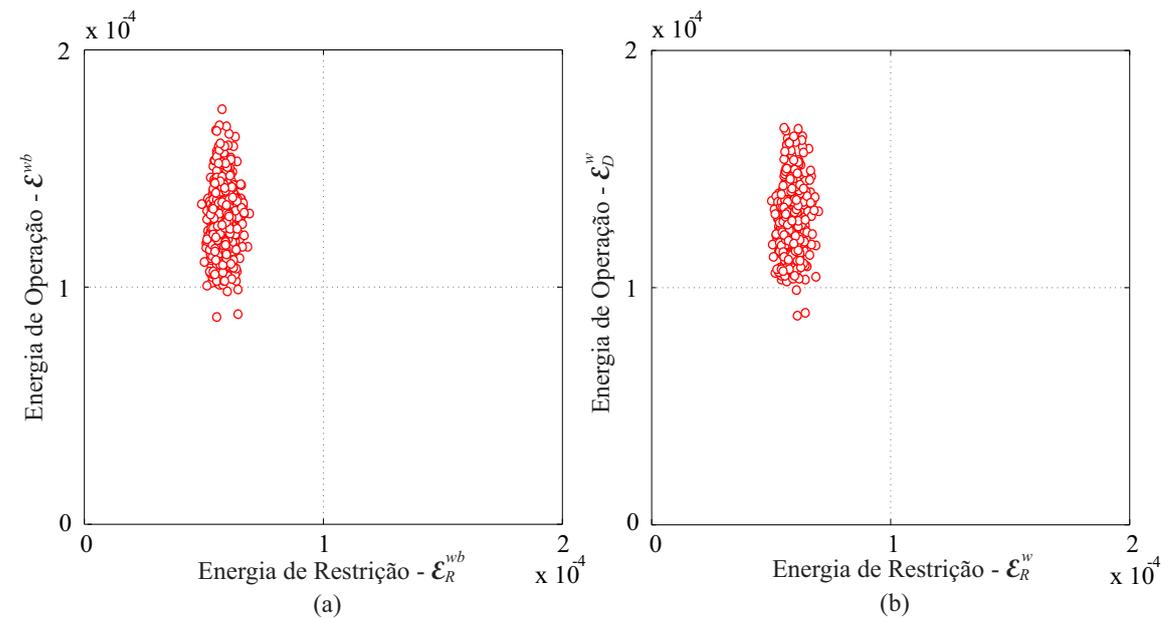


Figura 6.4: Pontos de operação para os casos de faltas externas: a)  $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$ ; b)  $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$ .

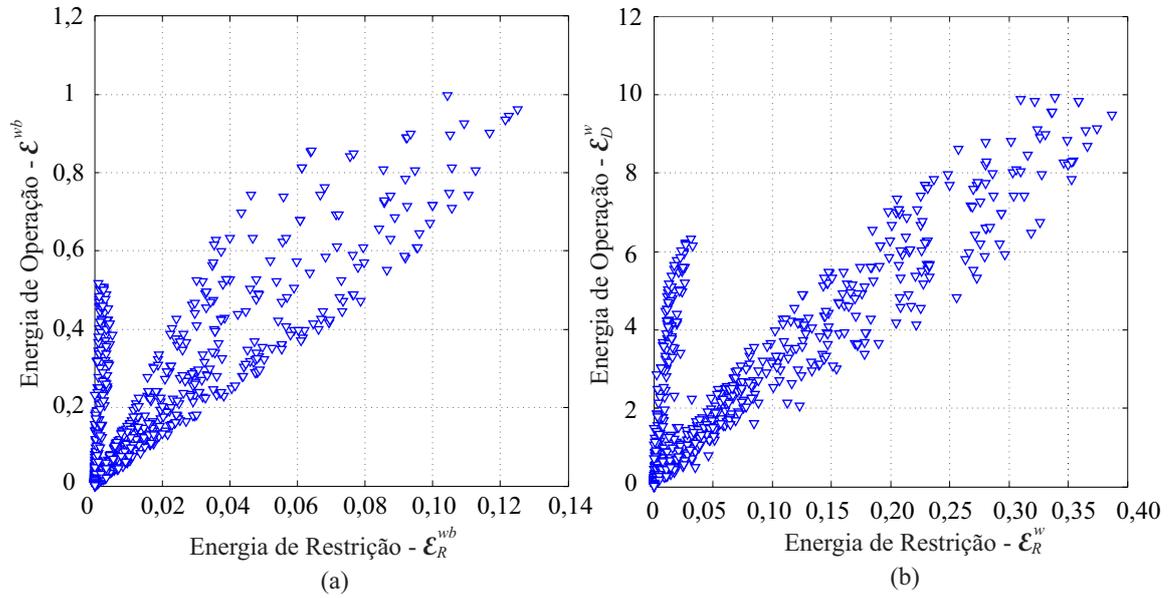


Figura 6.5: Pontos de operação para os casos de faltas internas: a)  $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$ ; b)  $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$ .

Com base nas distribuições dos pontos de operação  $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$  e  $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$  para cada caso, curvas características  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  foram traçadas (Figura 6.6), usando a *wavelet* mãe db(4), de maneira a separar do melhor modo os eventos.

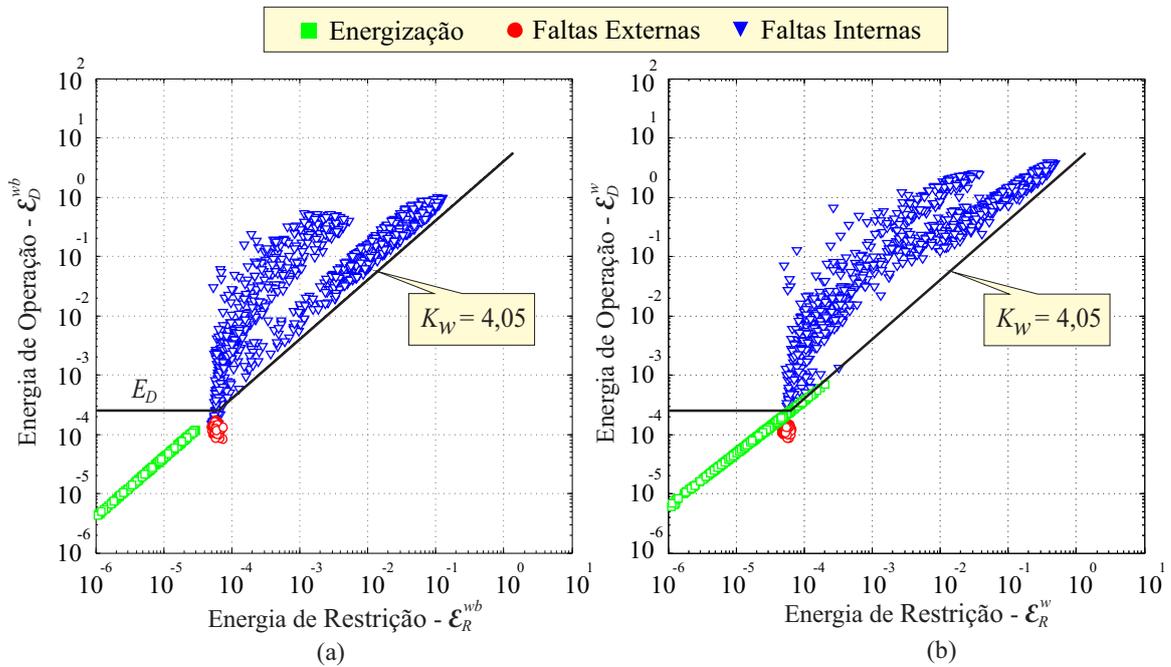


Figura 6.6: Curvas características obtidas usando a db(4): a) Curva  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b) Curva  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ .

De acordo com a Figura 6.6, os mesmos valores de inclinação  $K_w = 4,05$  e de limiar  $E_D = 2\bar{\mu}_\epsilon$  foram obtidos para as curvas características  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ .

## 6.4 Avaliação do Desempenho

O desempenho do esquema de proteção *wavelet* foi avaliado para a *wavelet* mãe db(4), com exceção do tópico no qual o efeito da variação da *wavelet* mãe foi avaliado. Um sinal de ruído branco gaussiano com relação sinal-ruído (*SNR*, do inglês *signal noise rate*) equivalente à 34 dB foi adicionado aos sinais de corrente  $i_{SA1}$ ,  $i_{SB1}$ ,  $i_{SC1}$ ,  $i_{SA2}$ ,  $i_{SB2}$ , e  $i_{SC2}$ . Os sinais de corrente foram amostrados a uma taxa de amostragem de  $f_s = 15,36$  kHz e filtrados por meio de um filtro anti-*aliasing*, passa-baixo, do tipo *Butterworth* de terceira ordem, com frequência de corte ( $f_c$ ) igual a:

$$f_c = \frac{0,9f_s}{2}. \quad (6.5)$$

A taxa de amostragem  $f_s = 15,36$  kHz justifica-se como sendo uma frequência na qual se é possível contemplar os transitórios gerados pelas faltas, além de ser a frequência de amostragem padrão de registradores digitais de perturbação (RDPs) atuais. Atualmente, já existem relés digitais multifuncionais com capacidade de processamento nessa frequência.

Neste trabalho, os métodos convencional ( $I_{OP} = f(I_{REST})$ ), *wavelet* sem efeito de borda ou *wavelet* convencional ( $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ) e *wavelet* com efeito de borda ( $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ ) foram avaliados e comparados quanto à taxa de acerto na detecção do evento e quanto ao atraso na detecção.

### 6.4.1 Energização do Transformador

Nesse estudo, um total de 75 casos diferentes de energização do transformador por meio do gerador conectado ao lado de baixa tensão, com fechamento sequencial dos disjuntores D8 e D7 da Figura 6.1, foi simulado. Na Tabela 6.3 são comparados os desempenhos dos métodos convencional, *wavelet* convencional e *wavelet* com borda, quanto à não-operação do esquema de proteção perante energização do transformador.

De acordo com a Tabela 6.3, todos os métodos apresentaram uma taxa de acerto de 100%, isto é, nenhum dos métodos detectou a condição de energização como sendo uma falta interna.

Tabela 6.3: Desempenho dos algoritmos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ , perante energização do transformador.

	$I_{OP} = f(I_{REST})$	$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$
Taxa de acerto(%)	100	100	100

### 6.4.2 Faltas Externas

Um total de 1000 casos aleatórios de faltas externas, segundo a Tabela 6.2, contemplando faltas longe e perto do transformador, com diversas resistências de falta e em diversos ângulos de incidência para todos os tipos de faltas, foi simulado e avaliado pelos métodos. Na Tabela 6.4 é sumarizado o desempenho dos métodos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ , quanto à não-operação do esquema de proteção perante faltas externas. Para esse tipo de evento, todos os métodos apresentaram uma taxa de acerto de 100%, garantindo a não operação do esquema de proteção.

Tabela 6.4: Desempenho dos algoritmos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ , perante faltas externas.

	$I_{OP} = f(I_{REST})$	$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$
Taxa de acerto(%)	100	100	100

### 6.4.3 Faltas Internas

Um total de 1000 registros aleatórios de faltas internas (Tabela 6.2) foi simulado e avaliado pelos métodos. Na Tabela 6.5 sumariza-se o desempenho dos métodos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ , quanto à detecção de faltas internas.

Tabela 6.5: Desempenho dos algoritmos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  na detecção de faltas internas.

	$I_{OP} = f(I_{REST})$	$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$
Taxa de acerto(%)	100	97,6	100

O algoritmo *wavelet* convencional  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  não detectou alguns casos de faltas internas com transitórios amortecidos, apresentando uma taxa de acerto de 97,6% e não se mostrando eficiente para a proteção diferencial de transformadores, enquanto que o algoritmo *wavelet* com bordas detectou 100% dos casos de faltas internas, apresentando

desempenho similar ao método convencional com restrição por harmônicos (Tabela 6.5). Os desempenhos dos métodos *wavelets*  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  são comparados na Tabela 6.6 para os casos de faltas internas que apresentaram transitórios amortecidos.

Tabela 6.6: Faltas internas com transitórios amortecidos.

Tipo da falta	Enrolamento	$R_f$	$\theta_i$	Detecção		$k$
				$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$	
AB	Secundário	74 $\Omega$	142°	-	✓	$k_f + 1$
AB	Secundário	75 $\Omega$	145°	-	✓	$k_f + 1$
AC	Secundário	25 $\Omega$	28°	-	✓	$k_f + 2$
AC	Secundário	28 $\Omega$	27°	-	✓	$k_f + 1$
AC	Secundário	98 $\Omega$	22°	-	✓	$k_f + 1$
AT	Secundário	35 $\Omega$	4°	-	✓	$k_f + 1$
AT	Secundário	74 $\Omega$	169°	-	✓	$k_f + 1$
AT	Secundário	90 $\Omega$	8°	-	✓	$k_f + 1$
AT	Secundário	96 $\Omega$	11°	-	✓	$k_f + 1$
BC	Secundário	25 $\Omega$	89°	-	✓	$k_f + 3$
BC	Secundário	50 $\Omega$	88°	-	✓	$k_f + 5$
BC	Secundário	93 $\Omega$	97°	-	✓	$k_f + 1$
BC	Secundário	96 $\Omega$	94°	-	✓	$k_f + 2$
BC	Secundário	97 $\Omega$	93°	-	✓	$k_f + 2$
BT	Secundário	100 $\Omega$	136°	-	✓	$k_f + 1$
BT	Secundário	13 $\Omega$	120°	-	✓	$k_f + 2$
BT	Secundário	68 $\Omega$	124°	-	✓	$k_f + 4$
BT	Secundário	71 $\Omega$	122°	-	✓	$k_f + 7$
BT	Secundário	96 $\Omega$	107°	-	✓	$k_f + 1$
CT	Secundário	64 $\Omega$	57°	-	✓	$k_f + 10$
CT	Secundário	69 $\Omega$	67°	-	✓	$k_f + 1$
CT	Secundário	74 $\Omega$	65°	-	✓	$k_f + 3$
CT	Secundário	75 $\Omega$	68°	-	✓	$k_f + 1$
CT	Secundário	75 $\Omega$	69°	-	✓	$k_f + 1$

De acordo com Costa, Souza e Brito (2012), existem situações específicas para determinados tipos de falta nas quais não se tem a presença de transitórios. Por exemplo, em faltas AT, algoritmos para detecção e localização de faltas baseados na análise de transitórios induzidos por faltas ou na análise de ondas viajantes podem falhar quando o ângulo de incidência da falta é próximo à 0°. Resistências de falta elevadas também implicam em transitórios amortecidos.

As energias  $\epsilon^{wb}$  são influenciadas pelos ruídos e transitórios de alta frequência, e para todos os casos listados na Tabela 6.6, nos quais os transitórios são amortecidos,  $\epsilon^{wb} < E_D$ , fazendo com que os pontos de operação se localizassem na região de restrição. Por outro

lado, as energias  $\epsilon^w = \epsilon^{wb} + \epsilon^{wa}$ , além dos ruídos e transitórios, são influenciadas pelos efeitos de borda. Portanto, mesmo nos casos sem transitórios, tem-se  $\epsilon^w > E_D$ , garantindo a detecção de todos os casos de faltas internas (Tabela 6.6). Na ausência de transitórios,  $\epsilon^w$  apresenta atraso de algumas amostras, visto que o efeito de borda se acentua à medida que as correntes aumentam (COSTA, 2014).

Nos estudos de proteção de sistemas elétricos, o tempo decorrido desde a ocorrência de uma falta até o momento em que é feita a remoção é de fundamental importância. Portanto, além da taxa de acerto, o tempo de atraso na detecção de faltas internas em cada método foi avaliado. Na Figura 6.7 é ilustrado um *Boxplot*, relacionando os tempos de atraso na detecção de faltas internas para os algoritmos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ .

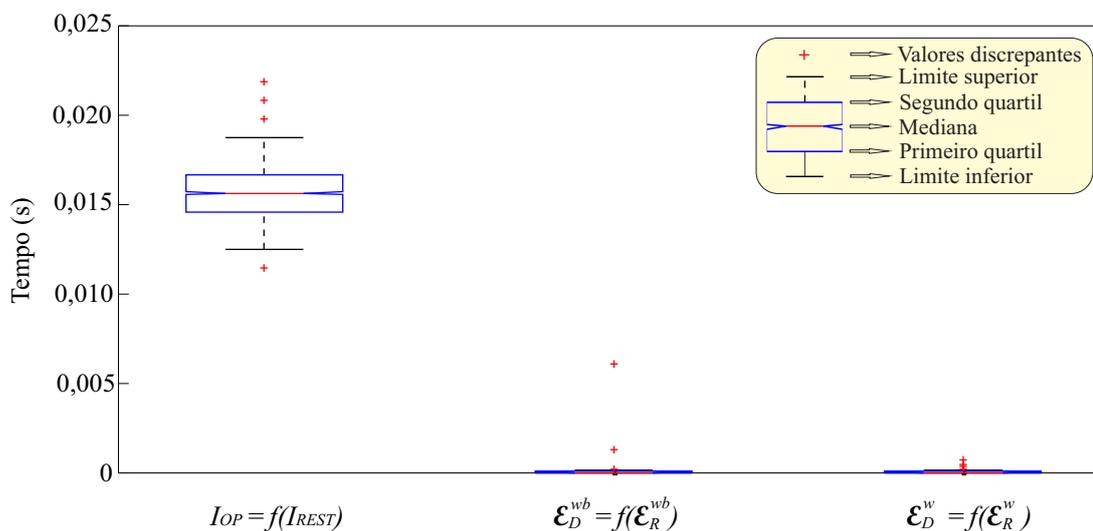


Figura 6.7: Diagrama de caixa para o tempo de atraso na detecção de faltas internas para os algoritmos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ .

De acordo com a Figura 6.7, o tempo mínimo de atraso na detecção de faltas internas para o algoritmo  $I_{OP} = f(I_{REST})$  foi  $t_{min} = 0,011458$  s. Além disso, 50% dos dados concentrou-se entre o primeiro e o segundo quartil, o que corresponde a um tempo aproximadamente igual a um ciclo (0,016 s), para  $f = 60$  Hz. Isto se deve ao fato do método convencional ser baseado na estimação dos fasores, que requer um tempo considerável para convergência após a falta. Os algoritmos  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  apresentaram tempos de atraso bem menores, quando comparados com o método convencional. Para o algoritmo  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ , o tempo médio de atraso foi  $t_{med} \approx 36 \mu\text{s}$ , enquanto que o algoritmo  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  apresentou  $t_{med} \approx 23 \mu\text{s}$  para  $f_s = 15,36$  kHz. Isto se deve ao fato

dos algoritmos baseados na transformada *wavelet* serem sensíveis às componentes de alta frequência presentes em um sinal de falta, o que justifica a detecção quase que instantânea dos métodos *wavelets* utilizados nesse trabalho.

Levando-se em consideração que  $\epsilon^w$  apresentou desempenho similar ao método convencional para os casos de energização do transformador, faltas externas e faltas internas, porém com tempo de detecção de faltas internas muito superior ao método convencional, então a utilização de relés de proteção diferencial baseados nas *wavelets* pode ser vista como uma boa alternativa na engenharia de proteção de sistemas elétricos.

#### 6.4.4 Efeito da *Wavelet* mãe

Um dos principais problemas reportados na literatura sobre a utilização da transformada *wavelet* é a seleção da *wavelet* mãe, que pode mudar conforme a aplicação. De acordo com Costa (2014), para detecção de transitórios rápidos e de curta duração, a db(4) e a db(6) apresentaram bons resultados, enquanto que para transitórios longos, a db(8) e a db(10) são melhores. Nesta seção será avaliado o efeito das *wavelets* mãe da família *Daubechies*: db(4), db(6), db(8), db(12) e db(90) e da família *Coiflets*: coif(6), coif(12) e coif(30), em que coif(L) corresponde à *wavelet* mãe da família *Coiflets* com L coeficientes, no desempenho das energias  $\epsilon^{wb}$  e  $\epsilon^w$ , quanto à confiabilidade e tempo de atraso na detecção dos casos de faltas internas descritos na Tabela 6.2.

#### Efeito da *Wavelet* Mãe Quanto à Confiabilidade na Detecção da Falta

Segundo Costa (2014), na detecção de faltas em linhas de transmissão, as energias  $\epsilon^{wb}$  são influenciadas pelos ruídos de alta frequência e pelos transitórios gerados pelas faltas, apresentando desempenho em função da escolha da *wavelet* mãe. Com relação à proteção de transformadores, propõe-se nesta dissertação a utilização das componentes de energia diferencial de operação ( $\epsilon_D$ ) e de restrição ( $\epsilon_R$ ), cuja influência da *wavelet* mãe em  $\epsilon_D$  é demonstrada na Figura 6.8.

De acordo com a Figura 6.8(a), a energia *wavelet* de operação sem efeito de borda  $\epsilon_D^{wb}$  decresce para longas *wavelets* durante a ocorrência da falta ( $k_f > k$ ). Por outro lado, a parcela de energia  $\epsilon^{wa}$  cresce quando a quantidade de coeficientes *wavelet* com efeitos de borda aumenta, isto é, para longas *wavelets* mãe. Uma vez que  $\epsilon^w = \epsilon^{wb} + \epsilon^{wab}$ , o efeito de borda tende a neutralizar o efeito da *wavelet* mãe (Figura 6.8(b)). Portanto, as energias  $\epsilon^w = \epsilon^{wa} + \epsilon^{wb}$  apresentam ótimo desempenho tanto para *wavelets* compactas quanto para *wavelets* longas.

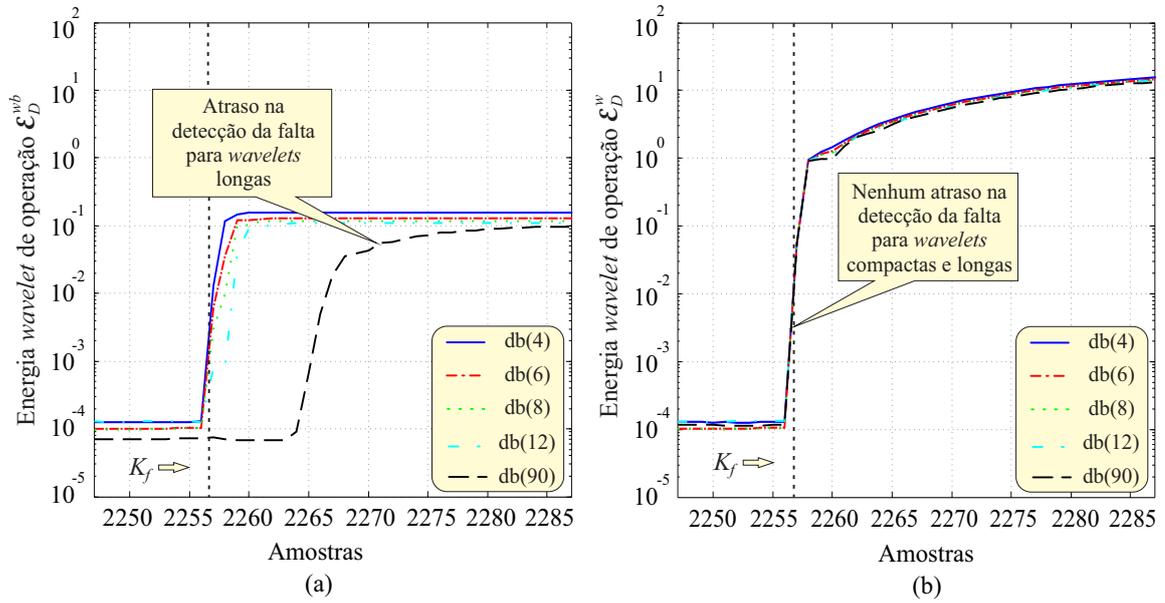


Figura 6.8: Efeito da *wavelet* mãe: a)  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b)  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ .

Neste trabalho, o efeito da variação da *wavelet* mãe foi verificado na base gerada para os casos de faltas internas aleatórias (Tabela 6.2). Na Tabela 6.7 são apresentados os desempenhos dos algoritmos  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  quanto à taxa de acerto na detecção de faltas internas para diversas *wavelets* mãe.

Tabela 6.7: Desempenho dos algoritmos  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  para detecção de faltas internas usando diferentes *wavelets* mãe.

Wavelet mãe	Taxa de acerto (%)	
	$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$
db(4)	97,6	100
db(6)	97,6	100
db(8)	97,2	100
db(12)	97,0	100
db(90)	97,9	100
coif(6)	97,6	100
coif(12)	97,7	100
coif(30)	97,2	100

De acordo com a Tabela 6.7, ao contrário das energias sem bordas  $\epsilon^{wb}$ , o algoritmo baseado nas energias com a presença das bordas  $\epsilon^w$  não foi afetado pela escolha da *wavelet* mãe, apresentando uma taxa de acerto de 100% quanto à correta detecção da falta interna para todas as *wavelets* avaliadas.

### Efeito da *Wavelet* Mãe Quanto ao Tempo de Atraso na Detecção da Falta

O cálculo dos coeficientes *wavelet* está associado a um processo de convolução entre o sinal original e um filtro *wavelet*, que é uma função da *wavelet* mãe. Portanto, inerente ao processo de filtragem, os coeficientes *wavelet* devem apresentar atrasos no tempo para o algoritmo recursivo que se acentuam com o aumento do tamanho dos filtros *wavelet*. Os coeficientes *wavelet* obtidos por meio de *wavelets* compactas, como a db(4), apresentam nenhum ou um mínimo atraso na detecção do instante inicial de falta, dependendo da severidade dos transitórios, enquanto que para *wavelets* longas, como a db(90), pode existir um considerável atraso no tempo (Figura 6.8(a)), tal como explicado por Costa (2014) na detecção de transitórios induzidos por faltas em linhas de transmissão.

As energias com borda  $\epsilon^w$  não apresentam nenhum atraso no tempo para qualquer *wavelet* mãe, pois, segundo Costa (2014), o efeito de borda da janela deslizante contrabalança os efeitos da *wavelet* mãe. Por exemplo, na Figura 6.8(b), os transitórios gerados pelas faltas são detectados no mesmo instante para *wavelets* mãe longas e compactas.

Nas Figuras 6.9 e 6.10 são ilustrados *Boxplots* comparando o desempenho dos algoritmos  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ , respectivamente, quanto ao atraso no tempo, em amostras, na detecção de faltas internas, para as *wavelets* mãe db(4), db(6), db(8), db(12) e db(90).

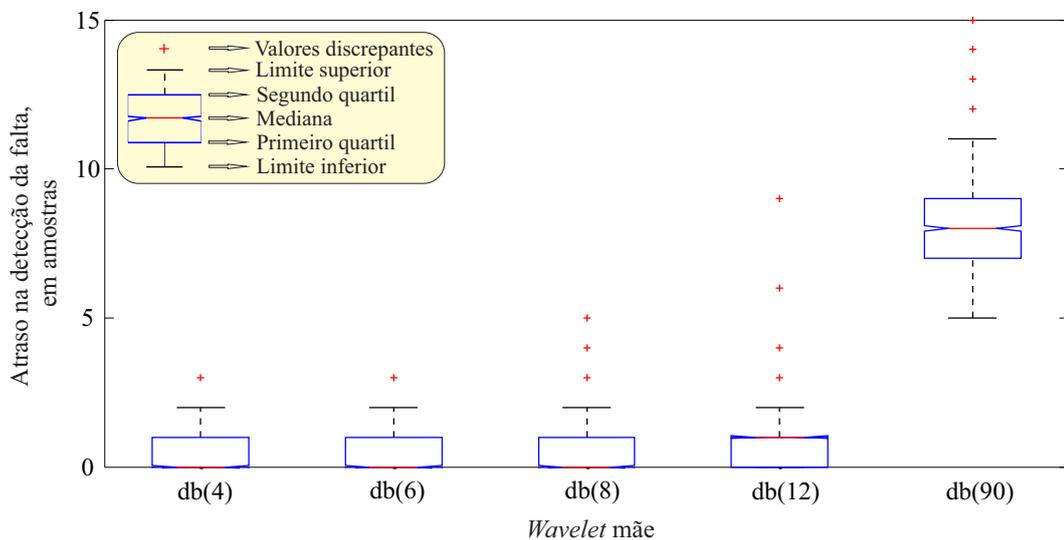


Figura 6.9: *Boxplot* para comparação do desempenho do algoritmo  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  para diversas *wavelets* mãe.

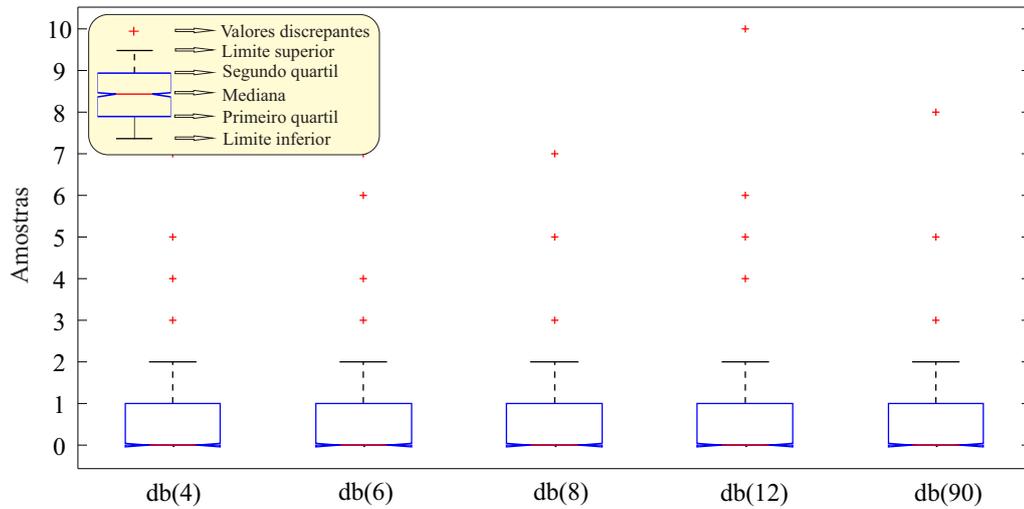


Figura 6.10: *Boxplot* para comparação do desempenho do algoritmo  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  para diversas *wavelets* mãe.

A eficiência dos algoritmos  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  quanto à detecção do instante de faltas internas também é apresentada na Tabela 6.8, isto é, a quantidade de amostras pós-falta que foram necessárias até a detecção do evento. A variável  $k_f$  corresponde à primeira amostra com falta.

Tabela 6.8: Desempenho dos algoritmos  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  para detecção do instante inicial de faltas internas usando diferentes *wavelets* mãe.

Wavelet mãe	Taxa de acerto (%)					
	$k_f$		$k_f + 1$		$\geq k_f + 2$	
	$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$	$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$	$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$
db(4)	56,15	66,90	41,60	31,70	2,25	1,40
db(6)	57,07	70,5	37,70	28,2	5,23	1,3
db(8)	51,75	70,30	39,50	28,40	8,75	1,30
db(12)	39,90	70,30	41,44	28,60	18,66	1,10
db(90)	0	70,50	0	28,30	100	1,20
coif(6)	25,51	67,80	60,96	30,80	13,53	1,40
coif(12)	8,09	70,40	49,64	28,10	42,27	1,50
coif(30)	0	70,30	0	28,40	100	1,30

Com relação ao atraso no tempo, de acordo com os dados apresentados nas Figuras 6.9 e 6.10 e na Tabela 6.8, o algoritmo  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  foi minimamente afetado pela *wavelet* mãe, enquanto que o algoritmo  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  apresentou atrasos no tempo para *wavelets* longas. Desse modo, o método calculado com os coeficientes *wavelet* de borda apresentou melhores resultados, tanto na eficiência para detectar corretamente a ocorrência das faltas

como na rapidez de detecção, não sendo afetado pela escolha da *wavelet* mãe.

### 6.4.5 Efeito do Ângulo de Incidência de Falta ( $\theta$ ) na Detecção de Falhas Internas

De acordo com Costa, Souza e Brito (2012), faltas em linhas de transmissão apresentam transitórios amortecidos em valores específicos de ângulos de incidência. Por exemplo, faltas AT com ângulo de incidência próximo à  $0^\circ$  ou  $180^\circ$  não apresentam transitórios. Portanto, métodos baseados na análise dos transitórios para detecção de faltas, tais como as *wavelets*, devem apresentar dificuldades em ângulos de incidência de falta específicos. Com relação à proteção dos transformadores de potência, para avaliação do efeito do ângulo de incidência de falta na detecção de faltas internas, faltas AT nos lados primário e secundário de T1 (Figura 6.1) foram simuladas com passos de variação de  $\Delta\theta = 1^\circ$ , totalizando 362 faltas (Tabela 6.9).

Tabela 6.9: Variação do parâmetro  $\theta$

Tipo da falta	Enrolamento	$\theta$	$R_f$	Total
AT	Primário	$0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ, \Delta\theta = 1^\circ$	1 $\Omega$	181
AT	Secundário	$0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ, \Delta\theta = 1^\circ$	1 $\Omega$	181

Na Figura 6.11 são ilustrados, respectivamente, os pontos de operação ( $\epsilon_R^{wb}$ ,  $\epsilon_D^{wb}$ ) e ( $\epsilon_R^w$ ,  $\epsilon_D^w$ ) correspondentes à amostra mais relevante em um intervalo de 1/8 ciclo pós-falta. Para melhor visualização da localização dos pontos de operação, os gráficos foram plotados em escala logarítmica.

De acordo com a Figura 6.11, todos os pontos de operação ficaram localizados acima da curva característica, isto é, na região de operação, tanto para  $\epsilon^{wb}$  quanto para  $\epsilon^w$ . Porém, os pontos de operação para  $\epsilon^w$  (Figura 6.11(b)) localizaram-se mais distantes da curva característica que os pontos de operação para  $\epsilon^{wb}$ . Desta forma, definiu-se um índice para quantificar a confiabilidade dos métodos *wavelet*.

Neste trabalho, a confiabilidade foi quantificada por meio de uma constante adimensional  $C$ , que denotou o quão distante da curva característica o ponto de operação se localizou, em um curto intervalo após a ocorrência da falta interna, no qual é esperado que os pontos de operação sejam superiores o mais distante possível da reta  $\epsilon_D = K_w \epsilon_R$ . Em termos matemáticos,  $C$  pode ser calculado como sendo a distância perpendicular do ponto de operação mais relevante em um intervalo de 1/8 de ciclo pós-falta à curva ca-

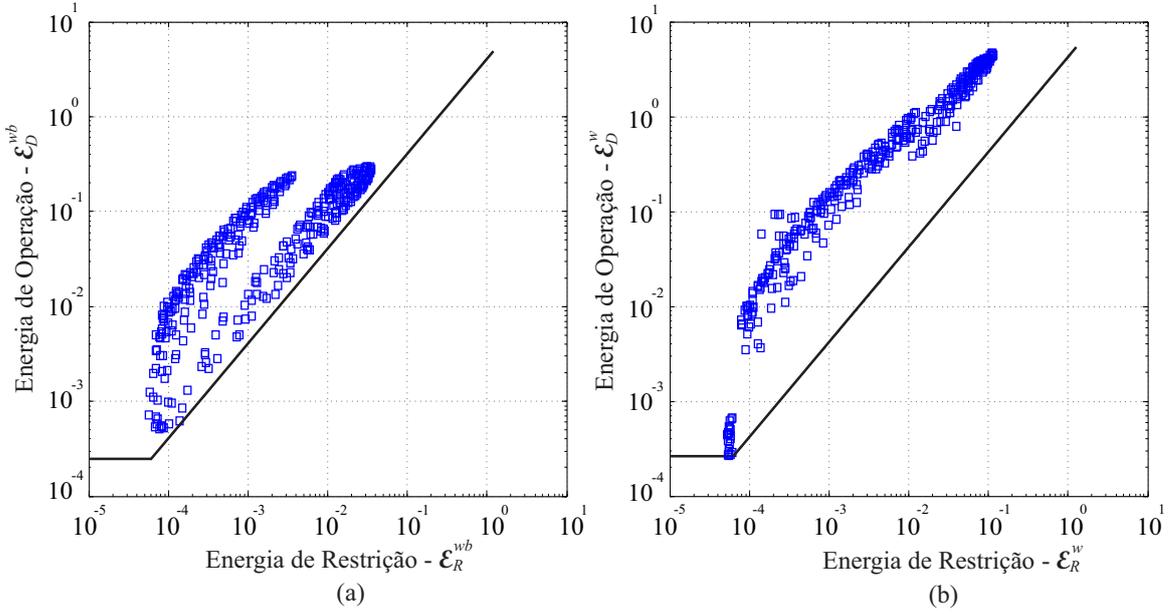


Figura 6.11: Efeito do Ângulo de Incidência de Falta ( $\theta$ ) na Detecção de Falhas Internas: a)  $\varepsilon_D^{wb} = f(\varepsilon_R^{wb})$ ; b)  $\varepsilon_D^w = f(\varepsilon_R^w)$ .

racterística de atuação do relé *wavelet*, como segue (A.1):

$$C = \frac{\varepsilon_D - K_w \varepsilon_R}{\sqrt{1 + K_w^2}}. \quad (6.6)$$

Portanto, a variável  $C$  é uma função das energias de operação, das energias de restrição e da constante de inclinação da curva característica do esquema de proteção *wavelet*. A confiabilidade média  $\bar{C}$  para todos os casos foi calculada como sendo:

$$\bar{C} = \frac{\sum C}{N}, \quad (6.7)$$

em que  $N$  corresponde ao número de casos avaliados.

Na Tabela 6.10 são comparados os desempenhos dos métodos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\varepsilon_D^{wb} = f(\varepsilon_R^{wb})$  e  $\varepsilon_D^w = f(\varepsilon_R^w)$ , quanto à taxa de acerto na detecção de falhas internas com variação de  $\theta$  e quanto à confiabilidade na detecção.

De acordo com a Tabela 6.10, todos os algoritmos detectaram todos os casos de falhas internas, porém, o algoritmo  $\varepsilon_D^w = f(\varepsilon_R^w)$  apresentou um maior índice de confiabilidade, cerca de 20 vezes maior ao do algoritmo  $\varepsilon_D^{wb} = f(\varepsilon_R^{wb})$ .

Para exemplificar o efeito do ângulo de incidência de falta sobre a confiabilidade dos algoritmos *wavelets* com e sem bordas, na Figura 6.12 são ilustrados os pontos de opera-

Tabela 6.10: Desempenho dos algoritmos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  na detecção de faltas internas com variação de  $\theta$ .

	$I_{OP} = f(I_{REST})$	$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$
Taxa de acerto(%)	100	100	100
$\bar{C}$	-	0,0169	0,2526

ção referentes a dois casos críticos de faltas internas espira-terra, nos quais não se verifica a presença de transitórios ( $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 180^\circ$ ).

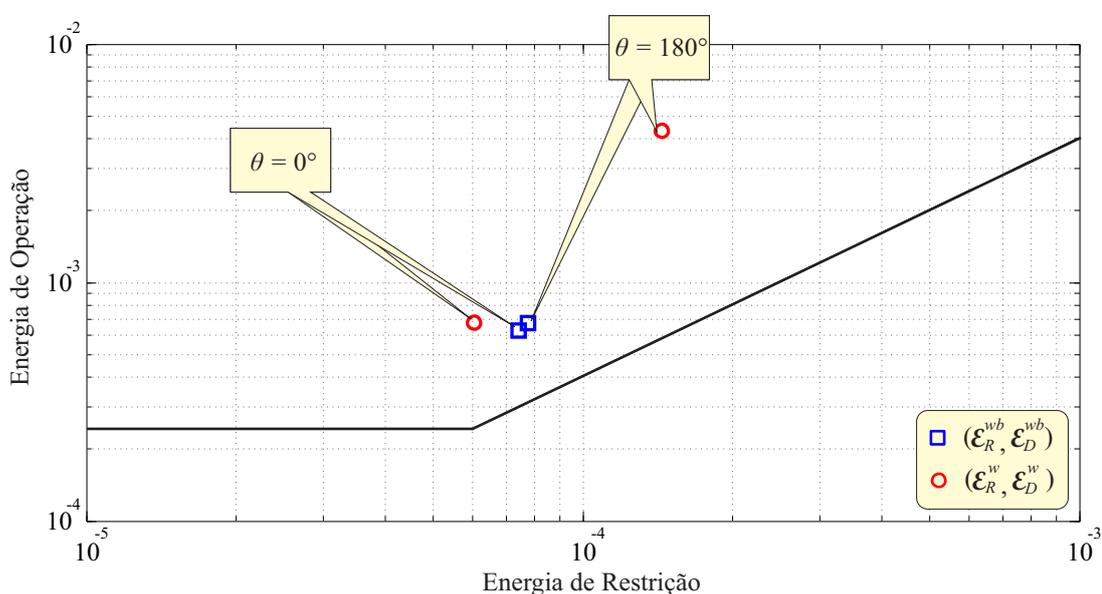


Figura 6.12: Pontos de operação referentes a dois casos de falta interna com ângulos de incidência  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 180^\circ$ , respectivamente.

Nesses dois casos,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  detectaram a falta, porém os pontos de operação calculados pelo algoritmo com bordas localizaram-se mais distantes da curva característica *wavelet*.

### 6.4.6 Efeito da Resistência de Falta ( $R_f$ ) na Detecção de Faltas Internas

Assim como o ângulo de incidência de falta, a resistência de falta é outro parâmetro importante na análise de faltas. Por exemplo, segundo Mokhtari e Aghatehrani (2005), a detecção de faltas de alta impedância é uma tarefa difícil e crucial para a engenharia de proteção dos sistemas elétricos. Nesses tipos de faltas, o aumento da corrente é nor-

malmente insignificante e os transitórios gerados pelas faltas são bastante amortecidos, dificultando a atuação de dispositivos de proteção convencionais. Para avaliação do efeito de  $R_f$  na detecção de faltas internas, faltas AT com ângulo de incidência  $\theta = 90^\circ$  nos lados primário e secundário do transformador foram simuladas com passos de variação de  $\Delta R_f = 1 \Omega$  (Tabela 6.11).

Tabela 6.11: Variação do parâmetro  $R_f$ .

Tipo da falta	Enrolamento	$\theta_i$	$R_f$	Total
AT	Primário	$90^\circ$	$1 \Omega \leq R_f \leq 100 \Omega, \Delta R_f = 1 \Omega$	100
AT	Secundário	$90^\circ$	$1 \Omega \leq R_f \leq 100 \Omega, \Delta R_f = 1 \Omega$	100

Na Figura 6.13 são ilustrados os pontos de operação  $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$  e  $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$  correspondentes à amostra mais relevante em um intervalo de 1/8 ciclo pós-falta. Os gráficos foram plotados em escala logarítmica.

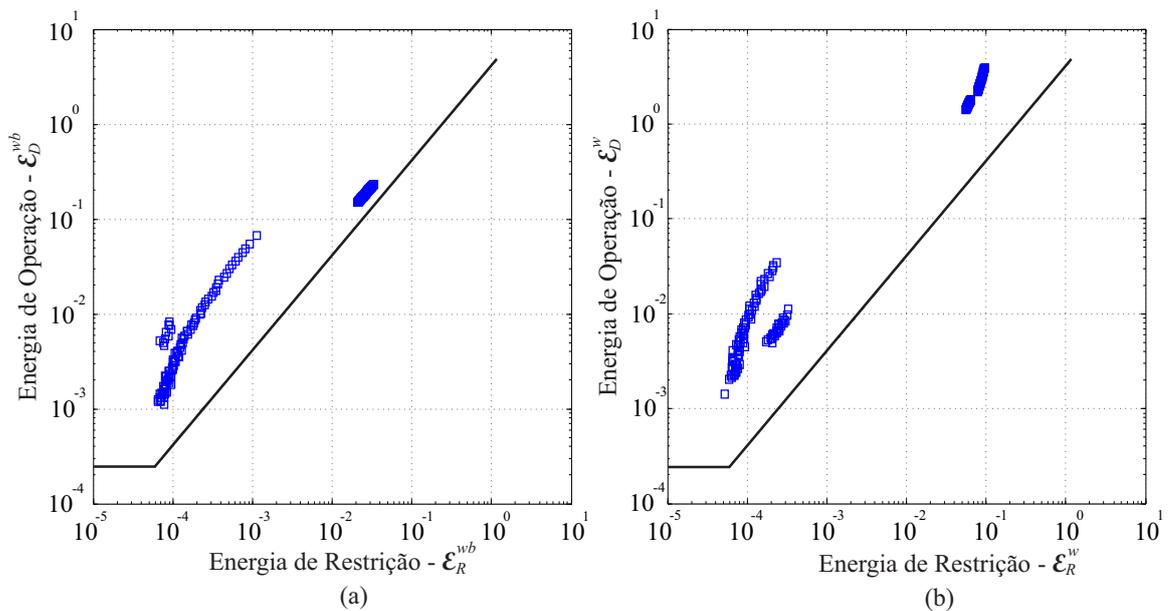


Figura 6.13: Efeito da resistência de falta ( $R_f$ ) na Detecção de Faltas Internas: a)  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b)  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ .

Os desempenhos dos métodos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  são sumarizados na Tabela 6.12, quanto à taxa de acerto na detecção de faltas internas com variação de  $R_f$  e quanto à confiabilidade na detecção.

Tabela 6.12: Desempenho dos algoritmos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  na detecção de faltas internas com variação de  $R_f$ .

	$I_{OP} = f(I_{REST})$	$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$
Taxa de acerto(%)	100	100	100
$\bar{C}$	-	0,0110	0,2840

De acordo com a Tabela 6.12, os métodos *wavelets* apresentaram desempenho similar ao método convencional, ao detectarem 100% dos casos de faltas internas. De acordo com a Figura 6.13, para  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ , todos os pontos de operação ficaram localizados acima da curva característica. Na Figura 6.14 é ilustrada a localização dos pontos de operação  $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$  e  $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$  em um caso crítico de falta superamortecida pela resistência (falta no lado delta com  $R_f = 100 \Omega$ ), a qual foi detectada pelos dois métodos *wavelets*. Portanto,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  não foram afetados pela resistência de falta. Com relação ao índice de confiabilidade, o algoritmo *wavelet* com bordas apresentou novamente o maior valor entre os métodos *wavelets*.

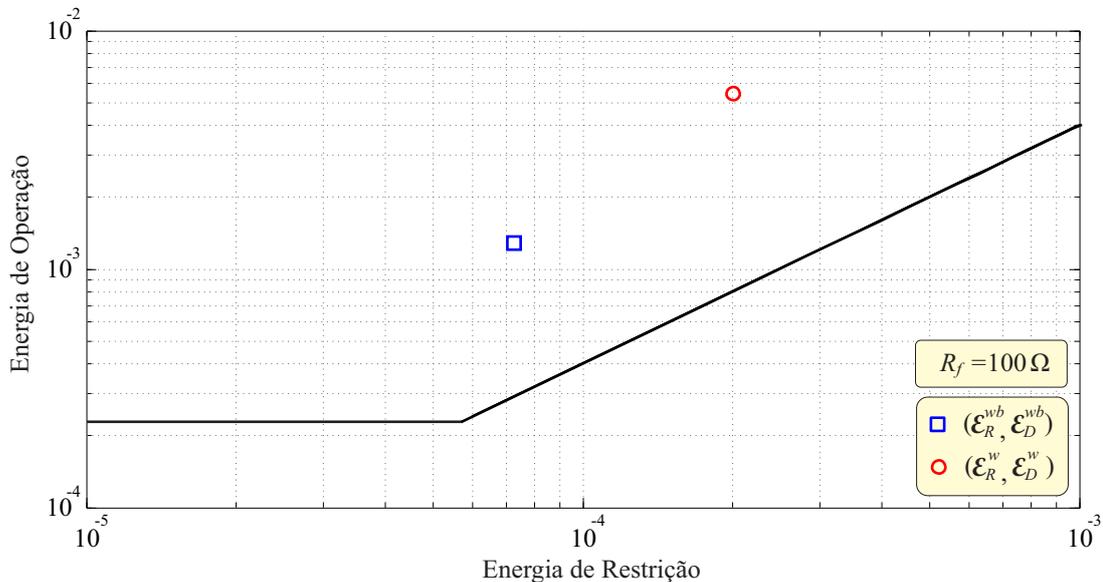


Figura 6.14: Pontos de operação referentes a um caso de falta interna com  $R_f = 100 \Omega$ .

### 6.4.7 Efeito da Variação da Percentagem de Espiras na Detecção de Faltas Internas

Um dos maiores desafios na engenharia de proteção dos transformadores de potência consiste na sensibilidade do dispositivo de proteção (relés de proteção diferencial ou relés

de proteção mecânica, tais como os relés *Buchholz*) para detecção de faltas internas entre espiras e espira-terra (HEATHCOTE, 2007). Entre os relés diferenciais convencionais, o elemento diferencial normalmente detecta a maioria das faltas internas em transformadores, excetuando as faltas entre espiras envolvendo poucas espiras e faltas espira-terra próximas ao neutro do transformador. Para avaliação do desempenho do esquema *wavelet* proposto nessa dissertação quanto ao efeito da variação da percentagem de espiras ( $e$ ) na detecção de faltas internas, os enrolamentos primário e secundário do transformador foram divididos em porções correspondentes a  $1 \leq \Delta e \leq 100\%$  dos seus totais, para valores de resistência, indutância e tensão relativa ao neutro (conexão estrela-aterrado) ou tensão relativa à uma outra fase (conexão delta). Nesse estudo, faltas espira-terra nos enrolamentos primário e secundário do transformador foram simuladas com um passo de variação percentual da quantidade total de espiras de  $\Delta e = 1\%$  (Tabela 6.13).

Tabela 6.13: Variação do parâmetro  $\Delta e$  para faltas espira-terra no transformador.

Tipo da falta	Enrolamento	$\theta_i$	$R_f$	$e$	Total
Espira-terra	Primário	$90^\circ$	$1 \Omega$	$1 \leq e \leq 99\%, \Delta e = 1\%$	99
Espira-terra	Secundário	$90^\circ$	$1 \Omega$	$1 \leq e \leq 99\%, \Delta e = 1\%$	99

A comparação dos desempenhos dos métodos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  é sumarizada na Tabela 6.14, quanto à taxa de acerto na detecção de faltas espira-terra no transformador e quanto à confiabilidade na detecção.

Tabela 6.14: Desempenho dos algoritmos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  na detecção de faltas espira-terra no transformador.

	$I_{OP} = f(I_{REST})$	$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$
Taxa de acerto(%)	96,97	96,97	98,48
$\bar{C}$	-	0,0126	0,3005

Na Figura 6.15 são ilustrados os pontos de operação  $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$  e  $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$  correspondentes à amostra mais relevante em um intervalo de  $1/8$  ciclo pós-falta. Os gráficos foram plotados em escala logarítmica.

De acordo com a Figura 6.15 e com os dados apresentados na Tabela 6.14, um total de 96,97% dos pontos de operação se localizaram na região acima da curva característica, para o algoritmo  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ , sendo não-detectáveis os casos de faltas internas envolvendo 1% e 2% do total de espiras no lado estrela do transformador, bem como os casos envolvendo 1, 2, 3% e 4% do total de espiras no lado delta. Para o algoritmo  $\epsilon_D^w$

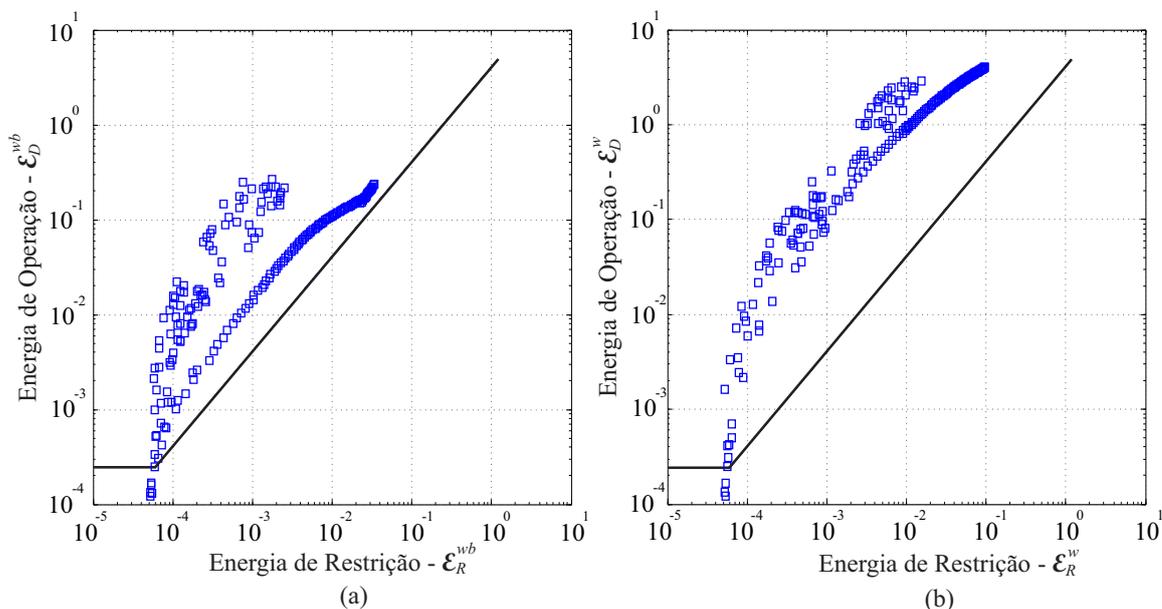


Figura 6.15: Efeito da variação da percentagem de espiras ( $e$ ) na detecção de faltas espira-terra no transformador: a)  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b)  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ .

$= f(\epsilon_R^w)$ , a taxa de acerto correspondeu à 98,48% do total de pontos de operação, sendo não-detectáveis apenas os casos de faltas internas no lado delta do transformador apresentando 1%, 2% e 3% do total de espiras correspondentes à fase A desse enrolamento. Comparado com o método convencional baseado no princípio de restrição por harmônicos, cuja taxa de acerto foi semelhante à do método *wavelet* sem bordas, o algoritmo  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  apresentou melhor desempenho. Além disso, o método *wavelet* com bordas apresentou o maior índice de confiabilidade.

O efeito de faltas envolvendo duas espiras nos lados primário e secundário do transformador também foi analisado. Nesse estudo, as espiras envolvidas na falta ( $A$ ,  $B$  ou  $C$ ), suas respectivas percentagens ( $e_A$ ,  $e_B$  e  $e_C$ ), bem como os enrolamentos (primário ou secundário) foram randomizados, conforme expresso na Tabela 6.15.

Tabela 6.15: Variação dos parâmetros de falta para faltas espira-espira no transformador.

Tipo da falta	Enrolamento	Espiras	Percentagem	Total
Espira-espira	Primário/Secundário	$A, B, C$	$1 \leq e_A, e_B, e_C \leq 100\%, \Delta e_A = \Delta e_B = \Delta e_C = 1\%$	100

Os pontos de operação  $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$  e  $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$  correspondentes à amostra mais relevante em um intervalo de 1/8 ciclo pós-falta são ilustrados na Figura 6.16, na qual os gráficos foram plotados em escala logarítmica.

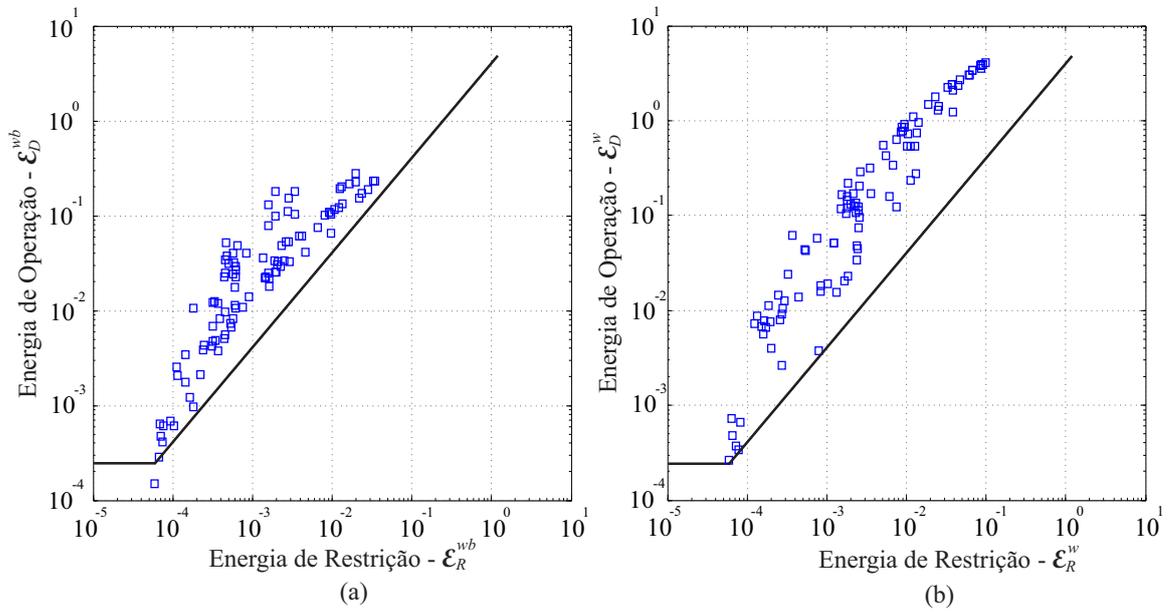


Figura 6.16: Efeito da variação dos parâmetros de falta na detecção de faltas espira-espira no transformador. a)  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b)  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ .

Os desempenhos dos métodos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_{iD}^{wb} = f(\epsilon_{iR}^{wb})$  e  $\epsilon_{iD}^w = f(\epsilon_{iR}^w)$  foram comparados na Tabela 6.16, quanto à taxa de acerto na detecção de faltas espira-espira no transformador e quanto à confiabilidade na detecção.

Tabela 6.16: Desempenho dos algoritmos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  na detecção de faltas espira-espira no transformador.

	$I_{OP} = f(I_{REST})$	$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$
Taxa de acerto(%)	100	99	100
$\bar{C}$	-	0,0091	0,1689

De acordo com a Figura 6.16 e com os dados apresentados na Tabela 6.16, o algoritmo  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  apresentou uma taxa de acerto de 99%, falhando em um caso no qual a falta ocorreu envolvendo 2% e 61% dos totais de espiras das fases A e B do enrolamento primário do transformador. O algoritmo *wavelet* com bordas obteve desempenho similar ao método convencional de restrição por harmônicos, apresentando uma taxa de acerto de 100% na detecção de faltas internas.  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  apresentou o maior índice de confiabilidade.

### 6.4.8 Remoção de Falhas Externas Próximas ao Transformador de Potência

Durante a remoção de faltas externas, as formas de onda das correntes primárias dos TCs apresentam comportamento similar ao observado com as correntes de *inrush* obtidas durante a energização do transformador (BERNARDES, 2006). Nesse estudo, foram simulados 50 diferentes casos de faltas externas e as consequentes remoções, com variação no instante de abertura do disjuntor D7 da Figura 6.1. Na Tabela 6.17 é descrito o parâmetro ( $t_{op}$ ), referente ao instante de abertura do disjuntor D7 quando da remoção da falta externa.

Tabela 6.17: Variação do parâmetro  $t_{op}$  para os casos de remoção de faltas externas.

Tipo da falta	$t_{op}$	Total
A, AB	aleatório	50

Na Figura 6.17 são ilustradas as trajetórias dos pontos de operação ( $\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb}$ ) e ( $\epsilon_R^w, \epsilon_D^w$ ) no plano da curva característica do esquema de proteção diferencial proposto, para um caso de remoção de falta externa. Para efeito de ilustração, foram plotados 16 pontos

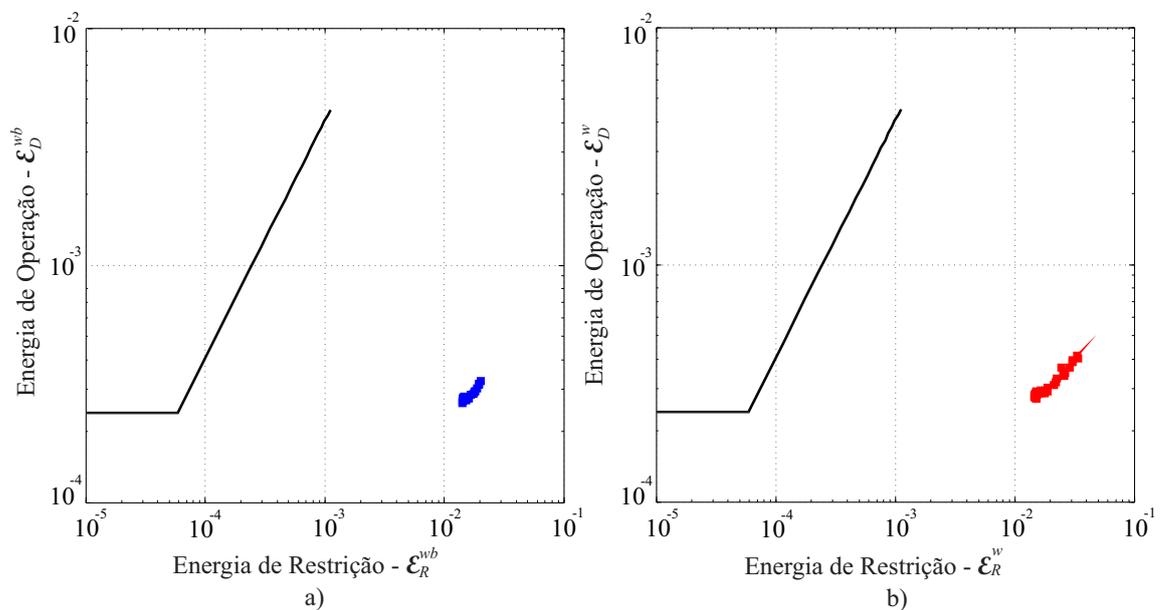


Figura 6.17: Remoção de falta externa próxima ao transformador: a)  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b)  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ .

após o início do distúrbio. Os gráficos foram plotados em escala logarítmica. Todos os

pontos  $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$  e  $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$  se localizaram na região abaixo da curva de operação (região de restrição).

Os desempenhos dos métodos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$  são apresentados na Tabela 6.18, quanto à não-operação do esquema de proteção perante a remoção de faltas externas.

Tabela 6.18: Desempenho dos algoritmos  $I_{OP} = f(I_{REST})$ ,  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$  e  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ , quanto à não-operação do esquema de proteção perante a remoção de faltas externas.

	$I_{OP} = f(I_{REST})$	$\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$	$\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$
Taxa de acerto(%)	100	100	100

De acordo com a Tabela 6.18, todos os métodos apresentaram uma taxa de acerto equivalente à 100%, isto é, nenhum dos algoritmos detectou o evento como sendo uma falta interna.

## 6.4.9 Saturação dos TCs

Segundo IEEE Std C37.110-2007 (2008), o efeito da saturação do TC sobre relés diferenciais depende se a falta é externa ou interna à zona de proteção. Para faltas internas, relés diferenciais devem ser concebidos de modo que eles operem antes do aparecimento da forma de onda distorcida. A preocupação mais relevante é a possível falha de operação dos relés diferenciais para faltas externas, nas quais podem ser observadas correntes diferenciais maiores que os valores ajustados para operação do relé diferencial. Nesses casos, o relé tende a considerar a falta externa como interna, operando indevidamente.

Os efeitos da saturação podem ser evitados se o TC for dimensionado de modo que a tensão no ponto de joelho da curva de saturação do TC ( $V_x$ ), esteja acima do valor requerido para a máxima corrente de falta esperada ( $I_s$ ) e carga especificada no secundário do TC ( $Z_s$ ):

$$V_x = I_s Z_s. \quad (6.8)$$

Como as correntes de falta, muitas vezes, apresentam componentes DC, a tensão requerida para evitar a saturação é dada por:

$$V_x = I_s Z_s \left( \frac{X}{R} \right), \quad (6.9)$$

em que  $X$  corresponde à reatância primária do sistema e  $R$  corresponde à resistência no ponto de falta. Esses requisitos tornam necessária a utilização de TCs com núcleos maio-

res, dificultando o seu projeto. Desse modo, algumas medidas compensadoras devem ser realizadas para minimização do efeito da saturação sobre os relés de proteção (IEEE Std C37.110-2007, 2008).

O tempo requerido até o início da saturação do TC é importante no projeto e aplicação de relés de proteção, sendo determinado por alguns fatores, como: grau de assimetria da corrente de falta, magnitude da corrente de falta, fluxo remanescente no núcleo do TC e impedância do circuito secundário do TC. Neste trabalho, o efeito da saturação dos TCs na presença de faltas externas foi avaliado por meio da variação da carga resistiva conectada ao enrolamento secundário de um dos TCs. Na Figura 6.18 são ilustrados dois casos de faltas externas. O primeiro deles foi simulado para não apresentar saturação do TC, enquanto que o segundo foi simulado para apresentar a ocorrência da saturação do TC. De acordo com a Figura 6.18, o TC foi capaz de reproduzir com precisão a corrente de falta até aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de ciclo da frequência fundamental. Segundo o guia do IEEE para aplicação de TCs utilizados para proteção (IEEE std C37.110-2007), esse intervalo de tempo pode chegar a um ou até dois ciclos antes do início da saturação do TC. Em Pan, Vu e Hu (2004), Santos (2011) e Silva (2012) são propostos métodos para detecção e correção ou compensação dos trechos distorcidos dos sinais de correntes secundárias do TC.

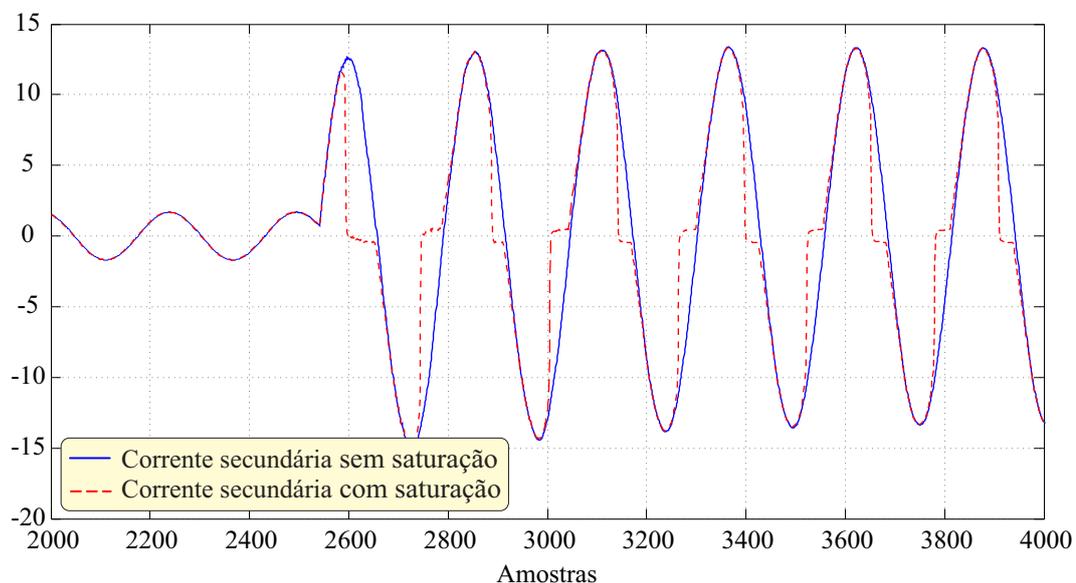


Figura 6.18: Falta externa com e sem o efeito de saturação nos TCs.

Na Figura 6.19 são ilustrados os comportamentos das energias de operação e restrição ( $\epsilon_D^{wb}$  e  $\epsilon_R^{wb}$ ) e ( $\epsilon_D^w$  e  $\epsilon_R^w$ ) em um caso de falta externa com saturação do TC. Na Figura 6.20

são ilustradas as trajetórias dos pontos de operação  $(\epsilon_R^{wb}, \epsilon_D^{wb})$  e  $(\epsilon_R^w, \epsilon_D^w)$ , após a ocorrência da falta e um pouco antes do início da saturação do TC.

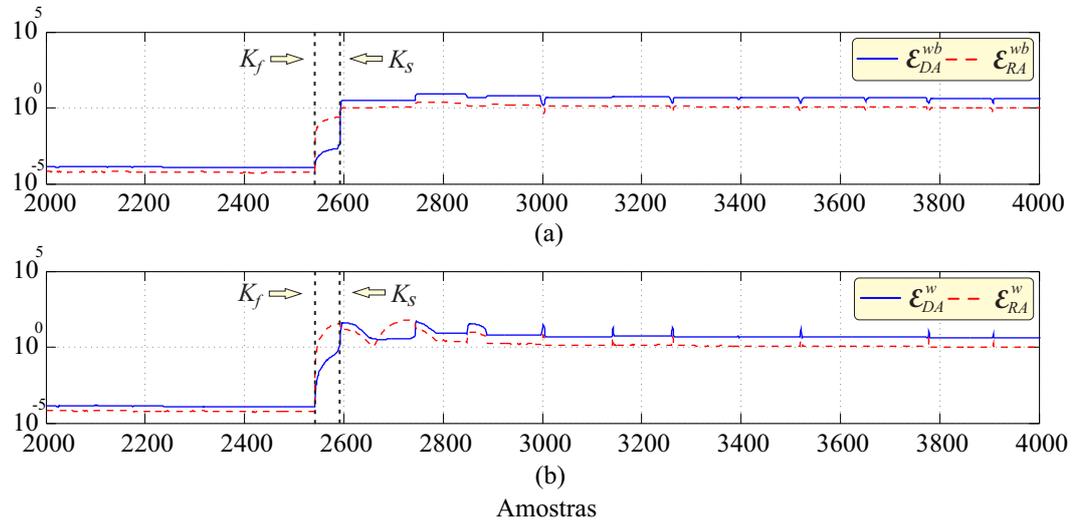


Figura 6.19: Saturação de TC devido à ocorrência de falta externa: a)  $\epsilon_D^{wb}$  e  $\epsilon_R^{wb}$ ; b)  $\epsilon_D^w$  e  $\epsilon_R^w$ .

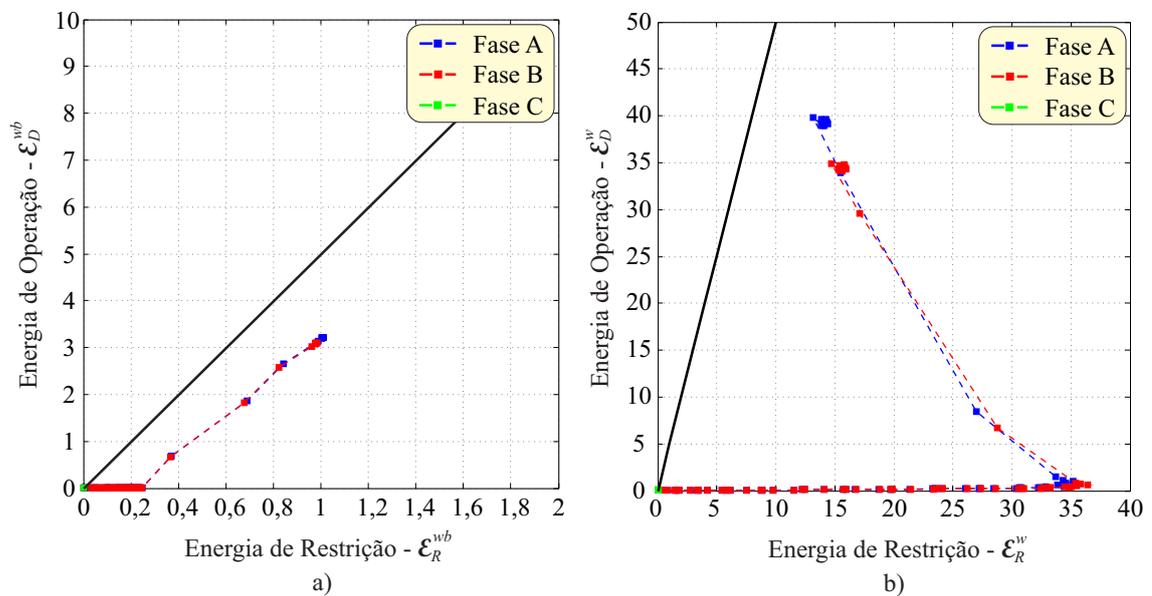


Figura 6.20: Saturação de TC devido à ocorrência de falta externa. a)  $\epsilon_D^{wb} = f(\epsilon_R^{wb})$ ; b)  $\epsilon_D^w = f(\epsilon_R^w)$ .

De acordo com a Figura 6.19, o perfil das energias de operação e de restrição varia antes da falta, durante a falta e após o início da saturação do TC. Por exemplo, em um

pequeno período pós-falta, as energias de restrição superam as energias de operação, indicando a ocorrência de um provável distúrbio que não seja uma falta interna. Porém, após esse período, as energias de operação superam as energias de restrição, indicando o início da saturação do TC. Na Figura 6.19, as variáveis  $K_f$  e  $K_s$  são, respectivamente, a primeira amostra com falta e a primeira amostra com saturação.

De acordo com a Figura 6.20, para efeito de ilustração, foi plotado um total de pontos pós-distúrbio correspondente a  $1/4$  de ciclo da frequência fundamental, isto é, para  $f_s = 15,36$  kHz, foram plotados 64 pontos dentro do intervalo  $[k_f k_s]$ . Os pontos de operação tenderam a convergir para a região de operação, na medida em que o efeito da saturação se manifestou durante a falta. Porém, o algoritmo de proteção *wavelet* é projetado para avaliar os eventos nas primeiras amostras pós-distúrbio, muito antes da saturação dos TCs. Além disto, por meio da utilização de esquemas de proteção baseados na análise de transitórios, como a transformada *wavelet*, é possível detectar os instantes de saturação do TC e corrigir este problema (PERERA; RAJAPAKSE, 2011; PERERA; RAJAPAKSE, 2012).

#### 6.4.10 Resumo

Neste capítulo, o desempenho dos métodos de proteção diferencial avaliados foi comparado quanto à taxa de acerto na detecção dos eventos (faltas externas, energização e faltas internas), influência da variação dos parâmetros de falta interna ( $R_f$ ,  $\theta$ ,  $e$ ), escolha da *wavelet* mãe e rapidez na detecção do evento. Como resultados relevantes, o algoritmo *wavelet* com bordas apresentou desempenho similar ao algoritmo convencional, porém com tempo de detecção de faltas internas muito superior, apresentando ser uma promissora alternativa para a engenharia de proteção de transformadores. Na Tabela 6.19 é sumarizado o desempenho geral dos métodos discutidos nessa dissertação.

Tabela 6.19: Resumo do desempenho dos métodos discutidos nessa dissertação.

Descrição	Convencional (Restrição por harmônicos)	<i>Wavelet</i> sem bordas	<i>Wavelet</i> com bordas
Taxa de acerto (faltas externas)	100%	100%	100%
Taxa de acerto (energização)	100%	100%	100%
Taxa de acerto (faltas internas)	100%	97,6%	100%
Desempenho afetado pela <i>wavelet</i> mãe		✓	-
Atraso no tempo em função da <i>wavelet</i> mãe		✓	-
Desempenho afetado por $\theta$	-	✓	-
Desempenho afetado por $R_f$	-	✓	-
Desempenho afetado por $e$	✓	✓	✓
Algoritmo mais rápido	-	-	✓

---

# Capítulo 7

## Conclusões e Trabalhos Futuros

---

### 7.1 Conclusões Gerais

Nesta dissertação foi proposto um novo modelo de proteção diferencial de transformadores de potência baseado nas energias dos coeficientes *wavelet* das correntes diferenciais de operação e restrição, com o uso da transformada *wavelet* discreta redundante, levando-se em consideração a formulação *wavelet* convencional e com efeitos de borda. As energias dos coeficientes *wavelet* da transformada *wavelet* discreta redundante provêm detecção rápida e confiável de eventos transitórios em transformadores de potência.

As energias de operação e de restrição foram utilizadas para detecção e sinalização da ocorrência de alguns distúrbios, tais como faltas externas, energização de transformadores e faltas internas, bem como para a detecção de faltas internas e atuação do esquema de proteção *wavelet*. O desempenho dos métodos *wavelet* baseados no cálculo das energias com e sem a presença das bordas e do método convencional da proteção diferencial de transformadores baseado no princípio de restrição por harmônicos foi avaliado e comparado, levando-se em consideração tanto a taxa de acerto na detecção de distúrbios (falta externa, energização do transformador e falta interna) quanto a rapidez da detecção de faltas internas.

Com relação à taxa de acerto na detecção dos distúrbios, para o algoritmo calculado sem o efeito das bordas, uma taxa de 97,6% foi obtida na detecção de faltas internas usando a *wavelet* mãe db(4), enquanto que foi verificada uma taxa de acerto de 100% para os algoritmos convencional e *wavelet* com bordas. Para faltas externas e situações de energização, os três métodos apresentaram uma taxa de acerto de 100% na detecção usando a db(4). Em relação ao tempo de atraso obtido na detecção de faltas internas, o algoritmo convencional apresentou um tempo médio de um ciclo, o que significa um tempo de 0,016 s para  $f = 60$  Hz, enquanto que os algoritmos *wavelets* apresentaram atrasos no tempo desprezíveis, em torno de  $30\mu$  s. Portanto, o esquema de proteção *wavelet* com

borda apresentou o melhor desempenho.

Com relação aos métodos *wavelets*, o método de proteção diferencial *wavelet* com a inclusão dos efeitos de bordas nas energias apresentou maiores índices de confiabilidade para faltas internas com variação do ângulo de incidência, resistência e percentagem de espiras. Além disso, ao contrário do algoritmo sem bordas, o algoritmo com bordas não foi afetado pela escolha da *wavelet* mãe, não apresentou atrasos no tempo em função da *wavelet* mãe e apresentou melhores resultados tanto na eficiência para detecção de faltas internas quanto na rapidez da detecção.

## 7.2 Perspectivas de Continuação do Trabalho

Como continuação dos estudos realizados nesta pesquisa, as seguintes propostas são sugeridas:

- Implementar a proteção diferencial baseada na energia dos coeficientes escala das correntes diferenciais de operação e restrição, que contempla as componentes de baixa frequência, tal como o método convencional, e avaliar os resultados;
- Ajustar o método para detectar e não levar em consideração os intervalos de saturação dos transformadores de corrente, em um caso de falta;
- Avaliar o desempenho do método levando-se em consideração o efeito do fluxo residual durante a energização do transformador;
- Implementar novas metodologias baseadas nas energias dos coeficientes *wavelet* em outros tipos de proteção de sistemas elétricos, como proteção diferencial de barramentos e proteção diferencial de linhas de transmissão;
- Implementar um protótipo de um relé *wavelet* em um DSP e avaliação de desempenho em tempo real.

---

## Referências Bibliográficas

---

ABB. *Protection Application Handbook*. [S.l.: s.n.], 1999.

AL-FAKHRI, B. The theory and application of differential protection of multi-terminal lines without synchronization using vector difference as restraint quantity - simulation study. In: *Developments in Power System Protection, 2004. Eighth IEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 2, p. 404–409 Vol.2.

BARBOSA, D. et al. Power transformer differential protection based on clarke's transform and fuzzy systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 2, p. 1212–1220, 2011.

BARBOSA, D. et al. Lógica nebulosa aplicada à proteção diferencial de transformadores de potência. *Sba: Controle Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, scielo, v. 22, p. 467 – 478, 10 2011. ISSN 0103-1759. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-17592011000500003&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592011000500003&nrm=iso)>.

BEHRENDT, K.; FISCHER, N.; LABUSCHAGNE, C. Considerations for using harmonic blocking and harmonic restraint techniques on transformer differential relays. *Journal of Reliable Power*, v. 2, n. 3, p. 36–52, 2011.

BERNARDES, A. P. *Esquema completo de proteção diferencial de transformadores para testes em um relé digital*. Dissertação (Mestrado) — USP, 2006.

BHALJA, B.; MAHESHWARI, R. New differential protection scheme for tapped transmission line. *Generation, Transmission Distribution, IET*, v. 2, n. 2, p. 271–279, March 2008.

BLACKBURN, J.; DOMIN, T. *Protective Relaying: Principles and Applications, Third Edition*. [S.l.]: Taylor & Francis, 2006.

BURRUS, C.; GOPINATH, R.; GUO, H. *Introduction to wavelets and wavelet transforms: a primer*. [S.l.]: Prentice Hall, 1998.

CHEN, W. et al. Study of wavelet-based ultra high speed directional transmission line protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 4, p. 1134–1139, 2003.

CORDRAY, R. E. Percentage-differential transformer protection. *Electrical Engineering*, v. 50, n. 5, p. 361–363, 1931.

COSTA, F.; DRIESEN, J. Assessment of voltage sag indices based on scaling and wavelet coefficient energy analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 1, p. 336–346, 2013.

COSTA, F.; SOUZA, B. Fault-induced transient analysis for real-time fault detection and location in transmission lines. In: *International Conference on Power Systems Transients.*, 2011.

COSTA, F.; SOUZA, B.; BRITO, N. Detection and Classification of Transient Disturbances in Power Systems. *IEEJ Transactions on Power and Energy*, v. 130, p. 910–916, 2010.

COSTA, F.; SOUZA, B.; BRITO, N. Real-time detection of fault-induced transients in transmission lines. *Electronics Letters*, v. 46, n. 11, p. 753–755, May 2010.

COSTA, F.; SOUZA, B.; BRITO, N. Effects of the fault inception angle in fault-induced transients. *Generation, Transmission Distribution, IET*, v. 6, n. 5, p. 463–471, May 2012.

COSTA, F.; SOUZA, B.; BRITO, N. S. D. Real-time detection of voltage sags based on wavelet transform. In: *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T D-LA)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 537–542.

COSTA, F. B. *Uma Técnica de Diagnóstico em Tempo Real de Distúrbios Transitórios Baseada na Transformada Wavelet para Uso em Registradores Digitais de Perturbação*. Dissertação (Mestrado) — UFCG, 2010.

COSTA, F. B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 29, n. 1, p. 140–153, Feb 2014.

DAUBECHIES, I. *Ten Lectures on Wavelets*. [s.n.], 1992. Disponível em: <[http://books.google.com.br/books?id=Nxnh48rS9jQC&printsec=frontcover&dq=ten+lectures+on+wavelets+bibtex&hl=pt-BR&sa=X&ei=EgZUU7aaAofLsATEv4GQDA&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com.br/books?id=Nxnh48rS9jQC&printsec=frontcover&dq=ten+lectures+on+wavelets+bibtex&hl=pt-BR&sa=X&ei=EgZUU7aaAofLsATEv4GQDA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)>.

EINVALL, C.-H.; LINDERS, J. R. A three-phase differential relay for transformer protection. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 94, n. 6, p. 1971–1980, 1975.

EISSA, M. Improvement of the differential busbar characteristic to avoid false operation during to ct saturation. *Generation, Transmission Distribution, IET*, v. 6, n. 10, p. 931–939, October 2012.

ELMORE, W. *Protective Relaying: Theory and Applications*. Taylor & Francis, 2003. (No Series). Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=1Jqhp-d-rhoUC>>.

FITZGERALD, A.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. *Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência*. BOOKMAN COMPANHIA ED, 2006. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=zsH5FZYJhb4C>>.

GAOUDA, A.; SALAMA, M. Dsp wavelet-based tool for monitoring transformer inrush currents and internal faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 3, p. 1258–1267, 2010.

GOMEZ-MORANTE, M.; NICOLETTI, D. A wavelet-based differential transformer protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 4, p. 1351–1358, 1999.

GUZMAN, A. et al. A current-based solution for transformer differential protection-part i: problem statement. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 4, 2002.

HAYWARD, C. Harmonic-current-restrained relays for transformer differential protection. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 60, n. 6, p. 377–382, 1941.

HEATHCOTE, M. J. *JP Transformer Book*. Elsevier, 2007. Disponível em: <[http://books.google.com.br/books?id=paPKsOXn5FMC&printsec=frontcover&dq=The+J&P+transformer+book&redir\\_esc=y](http://books.google.com.br/books?id=paPKsOXn5FMC&printsec=frontcover&dq=The+J&P+transformer+book&redir_esc=y)>.

HOROWITZ, S.; PHADKE, A. *Power System Relaying*. [S.l.]: Wiley, 2008.

IEEE Power System Relaying Committee. Emtp reference models for transmission line relay testing. In: . [S.l.: s.n.], 2004.

IEEE Std C37.110-2007. Ieee guide for the application of current transformers used for protective relaying purposes - redline. p. 1–83, April 2008.

IEEE Std C37.91-2008. Ieee guide for protecting power transformers. p. c1–139, 2008.

JOHNS, A.; SALMAN, S. *Digital Protection for Power Systems*. Peter Peregrinus, 1995. (I E E POWER ENGINEERING SERIES). Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=7NseAQAAIAAJ>>.

KHAN, M.; OZGONENEL, O.; RAHMAN, M. A. Diagnosis and protection of stator faults in synchronous generators using wavelet transform. In: *IEEE International Electric Machines Drives Conference, 2007. IEMDC '07*. [S.l.: s.n.], 2007. v. 1, p. 184–189.

KOLLA, S. R.; GEDEON, D. Microprocessor-based protection scheme for power transformers. In: *Electrical Electronics Insulation Conference, 1995, and Electrical Manufacturing Coil Winding Conference. Proceedings*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 195–198.

LIU, P. et al. Improved operation of differential protection of power transformers for internal faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 4, p. 1912–1919, 1992.

MALLAT, S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, v. 11, n. 7, p. 674–693, Jul 1989.

MCKENNA, G. W. Theory and application of transformer differential protection. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 69, n. 2, p. 1197–1202, 1950.

- MEGAHED, A.; MOUSSA, A. M.; BAYOUMY, A. Usage of wavelet transform in the protection of series-compensated transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 3, p. 1213–1221, 2006.
- MOKHTARI, H.; AGHATEHRANI, R. A new wavelet-based method for detection of high impedance faults. In: *Future Power Systems, 2005 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 6 pp.–6.
- MONTGOMERY, D. et al. *Probabilidade e estatística na engenharia*. Livros Técnicos e Científicos, 2006. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=9AVgPgAACAAJ>>.
- NETO, C. M. S. *Estabilizador de sistema de potência para máquinas síncronas de polos salientes utilizando a transformada wavelet*. Dissertação (Mestrado) — UFRN, 2013.
- NEVES, W. L. A. *Transformer modelling for transient studies*. Dissertação (Mestrado) — British Columbia, 1994.
- OLIVEIRA, J. de; COGO, J.; ABREU, J. de. *Transformadores: teoria de ensaios*. [S.l.]: E. Blucher, 1984.
- OLIVEIRA, M.; BRETAS, A. Application of discrete wavelet transform for differential protection of power transformers. In: *2009 IEEE Bucharest PowerTech*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–8.
- OLIVEIRA, M. O. *Proteção Diferencial de Transformadores Trifásicos Utilizando a Transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado) — UFRS, 2009.
- OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R. *Discrete-Time Signal Processing*. Pearson Education, 2006. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=geTn5W47KEsC>>.
- OSMAN, A.; MALIK, O. P. Transmission line distance protection based on wavelet transform. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 2, p. 515–523, 2004.
- PAITHANKAR, Y.; BHIDE, S. *Fundamentals of Power System Protection*. [S.l.]: Prentice-Hall of India, 2004.
- PAN, J.; VU, K.; HU, Y. An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 4, p. 1623–1628, Oct 2004.
- PERCIVAL, D.; WALDEN, A. *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000. (Cambridge series on statistical and probabilistic mathematics).
- PERERA, N.; RAJAPAKSE, A. Recognition of fault transients using a probabilistic neural-network classifier. In: *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–1.

PERERA, N.; RAJAPAKSE, A. Design and hardware implementation of a modular transient directional protection scheme using current signals. *Generation, Transmission Distribution, IET*, v. 6, n. 6, p. 554–562, June 2012.

PEREZ, F.; ORDUNA, E.; GUIDI, G. Adaptive wavelets applied to fault classification on transmission lines. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 5, n. 7, p. 694–702, 2011.

PRADHAN, A. et al. Wavelet fuzzy combined approach for fault classification of a series-compensated transmission line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 4, p. 1612–1618, 2004.

SALEH, S.; RAHMAN, M. Modeling and protection of a three-phase power transformer using wavelet packet transform. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 1273–1282, 2005.

SALEH, S.; SCAPLEN, B.; RAHMAN, M. A new implementation method of wavelet-packet-transform differential protection for power transformers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 47, n. 2, p. 1003–1012, 2011.

SANTOS, E. M. *Métodos para Correção das Distorções da Forma de Onda Secundária Causadas pela Saturação de Transformadores de Corrente para Serviço de Proteção*. Dissertação (Mestrado) — UFSM, 2011.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. *Compensação angular e remoção da componente de sequencia zero na proteção diferencial*. Pullman, Washington USA. 10 p.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. *Modelagem de transformador aplicada à proteção diferencial*. Pullman, Washington USA. 22 p.

SHAH, A.; BHALJA, B. Discrimination between internal faults and other disturbances in transformer using the support vector machine-based protection scheme. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 3, p. 1508–1515, 2013.

SILVA, K. *Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*. Tese (Doutorado) — UFCG, 2009.

SILVA, K.; SOUZA, B.; BRITO, N. S. D. Fault detection and classification in transmission lines based on wavelet transform and ann. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 21, n. 4, p. 2058–2063, Oct 2006.

SILVA, R. C. S. *Proteção Diferencial de Geradores Síncronos: O Uso de Redes Neurais Artificiais para Identificação e correção da saturação dos transformadores de corrente*. Dissertação (Mestrado) — USP, 2012.

SUTHERLAND, P. Application of transformer ground differential protection relays. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 36, n. 1, p. 16–21, 2000.

TAVARES, K. A. *Modelagem e simulação da proteção diferencial de transformadore de potência no ATP*. Dissertação (Mestrado) — UNB, 2013.

TAVARES, K. A.; SILVA, K. M. On modeling and simulating the differential protection of power transformers in atp. In: *11th International Conference on Developments in Power Systems Protection, 2012. DPSP 2012*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6.

VAZQUEZ, E. et al. Transformer differential protection using principal component analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 1, p. 67–72, 2008.

---

# Apêndice A

## Determinação geométrica do índice de confiabilidade C

---

Neste anexo é descrito o procedimento geométrico adotado para determinação do índice de confiabilidade  $C$ .

### A.1 Determinação de C

Na Figura A.1, é ilustrado um exemplo no qual o ponto de operação  $(\epsilon_R, \epsilon_D)$  se localizou acima da curva de atuação do relé, isto é, na região de operação.

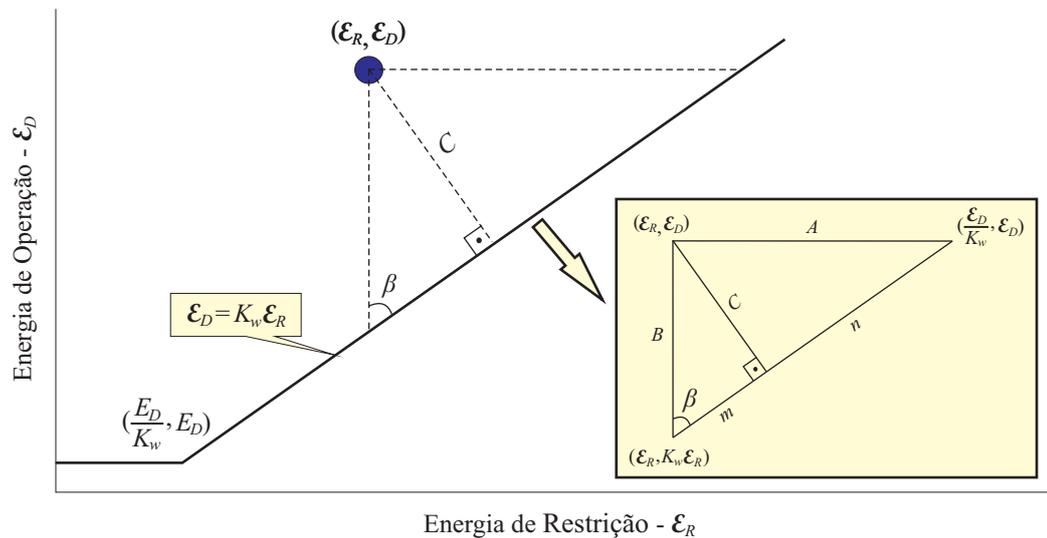


Figura A.1: Determinação geométrica do índice de confiabilidade.

De acordo com a Figura A.1 e com as leis da geometria, a distância perpendicular  $C$

## APÊNDICE A. DETERMINAÇÃO GEOMÉTRICA DO ÍNDICE DE CONFIABILIDADE C91

entre o ponto de operação e a curva é dada por:

$$C = \frac{AB}{m+n}. \quad (\text{A.1})$$

A equação (A.1) pode ser escrita em função de  $\varepsilon_D$ ,  $\varepsilon_R$  e  $K_w$ :

$$C = \frac{\sqrt{(\varepsilon_R - \varepsilon_D/K_w)^2} \sqrt{(\varepsilon_D - K_w \varepsilon_R)^2}}{\sqrt{(\varepsilon_R - \varepsilon_D/K_w)^2 + (\varepsilon_D - K_w \varepsilon_R)^2}}. \quad (\text{A.2})$$

Com o desenvolvimento da equação (A.2), obtém-se ao final:

$$C = \frac{\varepsilon_D - K_w \varepsilon_R}{\sqrt{1 + K_w^2}}. \quad (\text{A.3})$$