



**PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAMENTOS BASEADA NA
TRANSFORMADA WAVELET**

ALFREDO MIGUEL PIANETA ESCUDERO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAMENTOS BASEADA NA
TRANFORMADA WAVELET

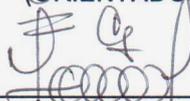
ALFREDO MIGUEL PIANETA ESCUDERO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



KLEBER MELO E SILVA, Dr., ENE/UnB
(ORIENTADOR)



JORGE ANDRÉS CORMANE, Dr., FGA/UnB
(EXAMINADOR INTERNO)



FLÁVIO BEZERRA COSTA Dr., ECT/UFRN
(EXAMINADOR EXTERNO)

FRANCISCO DAMASCENO FREITAS, Dr., ENE/UnB
(SUPLENTE)

Brasília, 20 de junho de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

ESCUDERO, ALFREDO MIGUEL PIANETA

Proteção diferencial de Barramentos Baseada na Transformada Wavelet. [Distrito Federal] 2016.

xiii, 97p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2016).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Proteção Diferencial

2. Transformada Wavelet

3. Barramento

4. ATP

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ESCUDERO, A. M. P. (2016). Proteção diferencial de Barramentos Baseada na Transformada Wavelet, Dissertação de Mestrado, Publicação PPGEE.DM-631/2016, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Alfredo Miguel Pianeta Escudero

TÍTULO: Proteção diferencial de Barramentos Baseada na Transformada Wavelet.

GRAU: Mestre ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Alfredo Miguel Pianeta Escudero

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a minha família. Meus pais Alfredo e Edilma, pelo amor, sempre incentivando um futuro melhor para seus filhos. Ao meu irmão Francisco, sua esposa Irene e meus sobrinhos Maria Fernanda e Matías. Também a minhas irmãs Ana Maria e Katherine pelo amor, apoio e motivação.

Aos professores Kleber Melo e Silva e Felipe Vigolvino Lopes pela amizade, confiança, paciência e sobre tudo a orientação e o grande desejo de transmitir o conhecimento para todos os alunos do grupo do laboratório de proteção de sistemas elétricos (LAPSE) da UnB. Agradeço muito a oportunidade de formar parte do seu grupo de trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro durante a elaboração deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora pelas valiosas contribuições que vieram para melhorar o trabalho.

Aos grandes amigos no Brasil Henry Castillo, sempre obrigado pelo apoio. Aos incondicionais, Lázaro Siqueira, Alejandro Ospina e Sergio Vélez.

A grandes amigos na Colômbia como Mario Arrieta, Cristo Hernandez, Diego Giraldo e Didier Loaiza, sempre atentos a ajudar em temas pessoais e técnicos durante esta etapa da minha vida.

Aos professores Rosa Elvira Correa, Clara Rojo e Jhon Albeiro Calderón pela motivação e suas orientações.

Aos amigos do LAPSE pelo respeito, paciência e confiança, especialmente por sempre aportar um pouco do seu conhecimento no trabalho e também por me acolher com muito carinho, muito grato com todos.

Finalmente agradeço aos professores e funcionários do departamento de engenharia elétrica, ENE (UnB), pela grande qualidade humana, sempre visando prestar um ótimo serviço à comunidade.

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho a implementação e testes de uma nova função de proteção diferencial numérica de baixa impedância para barramentos, na qual os conceitos da proteção diferencial tradicional são mapeados para a teoria da transformada *wavelet*. Para tanto, energias de operação e restrição são calculadas utilizando os coeficientes *wavelet* e escala obtidos a partir dos sinais de corrente medidos no sistema monitorado. Tradicionalmente, a operação da proteção de barramentos se baseia nos elementos filtrados, ou seja, nos fasores fundamentais, o que resulta em atrasos adicionais nas atuações da proteção. Neste trabalho, utilizam-se elementos instantâneos para reduzir os tempos de atuação. O critério de operação da proteção se baseia nas lógicas de atuação 1-de-1 e 2-de-2, as quais têm sido amplamente empregadas em relés reais disponíveis no comércio. Para avaliar a função de proteção proposta, diferentes condições de operação de um sistema de barra dupla de 230 kV foram simulados no *Alternative Transients Program* (ATP). Os resultados obtidos revelam que o esquema de proteção diferencial de barramentos proposto opera de forma seletiva em casos de faltas internas e externas ao barramento, resultando em tempos de atuação menores que 1 milissegundo, mesmo quando aplicado em subestações com configurações complexas e flexíveis. Além o esquema garante a operação estável durante condições de saturação de transformadores de corrente para faltas externas, considerada a situação mais adversa que pode afetar a proteção de barramentos, levando a eventuais operações indevidas da mesma.

Palavras-chave: Barramentos, detecção de transitórios, elementos instantâneos, proteção diferencial, transformada *wavelet*.

ABSTRACT

This work presents the implementation and test of a new numerical low-impedance busbar differential protection function, in which the fundamentals of traditional differential protection are adapted to the wavelet transform domain. In order to do so, operating and restraint energies are computed using the wavelet and scaling coefficients obtained from the current signals measured in the monitored system. Traditionally, the differential protection is based on filtered elements, i.e., in fundamental phasors, what results in additional operation delays. In this work, instantaneous elements are used in order to reduce the protection operation time. The 1-out-of-1 and 2-out-of-2 operating tripping logics are used, which have been widely applied in actual numerical relays commercially available. To evaluate the proposed protection function, different operating conditions of a 230 kV double busbar arrangement were simulated in the Alternative Transients Program (ATP). The obtained results reveal that the proposed busbar protection scheme is selective in cases of faults internal and external to the monitored busbar, resulting in protection operation times in the order of microseconds, even when it is applied in substations with complex and flexible topologies.

Keywords: Busbar, differential protection, instantaneous elements, transient detection, wavelet transform.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	viii
Lista de Símbolos	ix
Glossário	xiii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Motivação	3
1.3 Objetivos da Dissertação	4
1.4 Contribuições da Dissertação	4
1.5 Organização do Texto	5
1.6 Publicações Efetuadas	6
Capítulo 2 – Fundamentos da Proteção Diferencial de Baixa Impedância de Barramentos	7
2.1 Proteção Diferencial Numérica de Baixa Impedância	7
2.1.1 Corrente de Restrição Suavizada	9
2.2 Lógicas de <i>Trip</i> 1-de-1 e 2-de-2	11
2.3 Definição de Zonas de Proteção	14
2.4 Lógica de Seleção das Zonas de Proteção	17
2.4.1 Transferência da Proteção	18
2.4.2 Efeito do Acoplamento Mútuo de Sequência Zero em Linhas de Transmissão	20
2.5 Estado de Contatos de Chaves Seccionadoras	22
2.5.1 Manobra de Fechamento da Chave Seccionadora	23
2.5.2 Chave Seccionadora em Posição Intermediária	24
2.5.3 Contato auxiliar 89A fechado	24

2.5.4	Manobra de Abertura da Chave Seccionadora	25
2.6	Síntese do Capítulo	25
Capítulo 3 – Fundamentos da Transformada <i>Wavelet</i>		26
3.1	Filtros <i>Wavelet</i> e Escala da TWDR	27
3.2	Algoritmo piramidal para cálculo da TWDR	28
3.2.1	Primeiro Nível de Resolução	29
3.2.2	Segundo Nível de Resolução	30
3.2.3	j -ésimo Nível de Resolução	31
3.2.4	Números de Níveis de Resolução da TWDR	31
3.2.5	Exemplo de Uso da TWDR	32
3.3	Cálculo da TWDR Rápida	33
3.4	Energia dos Coeficientes <i>Wavelet</i> e Escala	34
3.5	Síntese do capítulo	35
Capítulo 4 – Revisão Bibliográfica		36
4.1	Proteção Diferencial Tradicional de Barramentos	36
4.2	Proteção de Barramentos Baseada na Teoria <i>Wavelet</i>	39
4.3	Síntese do Capítulo	43
Capítulo 5 – Algoritmo Proposto		45
5.1	Descrição Resumida do Algoritmo Proposto	46
5.2	Normalização das Amostras das Correntes	47
5.3	Cálculo da TWDR	48
5.4	Seleção de Zonas	49
5.5	Cálculo dos Coeficientes de Operação e Restrição	50
5.6	Cálculo da Energia dos Coeficientes de Operação e Restrição	50
5.7	Energia de Restrição Suavizada	52
5.8	Detecção de Distúrbios	53
5.9	Detecção de Falta Externa	55
5.10	Lógicas de <i>Trip</i>	56
5.11	Síntese do Capítulo	59
Capítulo 6 – Análise dos Resultados		60
6.1	Descrição do Sistema de Potência Analisado	60
6.2	Simulações e Resultados	62
6.3	Avaliação da influência da <i>wavelet</i> mãe	64

6.4	Análise da Variação da Taxa de Amostragem na Proteção de Barramentos	68
6.5	Análise do Efeito de Presença de Ruído nos Sinais	70
6.6	Curto-Circuitos Aplicados no Sistema	71
6.6.1	Caso 1: Curto-Circuito Monofásico Interno na Barra 1, Zona 1	71
6.6.2	Avaliação da Variação Paramétrica do Caso 1	73
6.6.2.1	Efeito da Variação do Ângulo de Incidência de Falta na Detecção de Faltas Internas	73
6.6.2.2	Efeito da Variação da Resistência de Falta na Detecção de Faltas Internas	75
6.6.3	Caso 2: Curto-Circuito Trifásico Interno Adjacente ao DJIB	76
6.6.4	Caso 3: Curto-Circuito Trifásico Interno Durante uma Situação de Paralelismo de Barra	78
6.6.5	Caso 4: Curto-Circuito Monofásico Externo Sem Saturação de TC, na LT2, Zona 2	79
6.6.6	Caso 5: Curto-Circuito Monofásico Externo com Saturação de TC, na LT1, Zona 1	81
6.6.7	Caso 6: Curto-Circuito Evolutivo Externo para Interno	82
6.6.8	Avaliação da Variação Paramétrica do Caso 6	84
6.6.8.1	Efeito da Variação do Ângulo de Incidência de Falta na Detecção de Faltas Internas no Curto Evolutivo	84
6.6.9	Caso 7: Curto-Circuito Monofásico Interno na B ₁ , Zona 1, com Proteção Transferida	87
6.7	Comparação Proteções 87B e 87BW	89
6.8	Síntese do Capítulo	91
Capítulo 7 – Conclusões e Trabalhos Futuros		92
7.1	Trabalhos Futuros	93
Referências Bibliográficas		94

LISTA DE FIGURAS

2.1	Lei das correntes de Kirchhoff aplicada a um barramento.	8
2.2	Cálculo das correntes de operação e restrição : (a) Falta externa ; (b) Falta interna.	9
2.3	Influência do valor de SLP na sensibilidade do relé: (a) $SLP = 0,3$ (relé mais sensível); (b) $SLP = 0,7$ (relé menos sensível).	9
2.4	Influência da saturação de TC nas formas de onda das energias	10
2.5	Circuito para exemplificar processo de carga e descarga de um capacitor.	11
2.6	Avaliação das lógicas de <i>trip</i> para: (a) uma falta interna; (b) uma falta externa sem saturação de TC; (c) uma falta externa com saturação de TC.	12
2.7	Diagrama de blocos das lógicas de <i>trip</i> 1-de-1 e 2-de-2 (ZIEGLER, 2012).	12
2.8	Zonas de proteção de barramento duplo.	15
2.9	Conexão ao barramento, Chave seccionadora seletora de barramento.	15
2.10	Ilustração das zonas de proteção: (a) zonas física e lógica coincidentes; (b) zonas física e lógica diferentes, com a zona lógica contraída.	16
2.11	Esquemas de proteção no DJIB: (a) com sobreposição de zonas; (b) sem sobreposição de zonas e com a abertura inicial do DJIB.	16
2.12	Efeito do acoplamento mútuo de sequência zero em linhas de transmissão.	21
2.13	Representação dos contatos auxiliares das chaves seccionadoras de um vão de saída.	22
2.14	Representação de estados de contatos auxiliares de chaves seccionadoras.	23
2.15	Representação de estados de contatos auxiliares chaves seccionadoras, totalmente aberta.	24

2.16	Representação de estados de contatos auxiliares chaves seccionadoras, posição intermediária.	24
2.17	Representação de estados de contatos auxiliares chaves seccionadoras, totalmente fechada.	25
3.1	Análise Multiresolução AMR na TWDR.	29
5.1	Diagrama de blocos geral do algoritmo proposto 87BW.	45
5.2	Diagrama de blocos do elemento diferencial <i>wavelet</i> proposto.	46
5.3	Cálculo dos coeficientes em tempo real: (a) sinal de corrente original; (b) coeficientes <i>wavelet</i> ; (c) coeficientes escala.	49
5.4	Cálculo diferencial dos coeficientes <i>wavelet</i> : (a) operação; (b) restrição.	50
5.5	Cálculo diferencial dos coeficientes escala: (a) operação; (b) restrição.	50
5.6	Cálculo das energias dos coeficientes <i>wavelet</i> : (a) operação; (b) restrição.	51
5.7	Cálculo das energias dos coeficientes escala: (a) operação; (b) restrição.	51
5.8	Escolha da janela para o cálculo da energia dos coeficientes.	52
5.9	Construção da energia de restrição suavizada.	53
5.10	Janelas de detecção de distúrbios.	54
5.11	Energias de operação e restrição durante: (a) falta externa sem saturação de TC; (b) falta externa com saturação de TC.	56
5.12	Forma hipotética das energias de operação e de restrição suavizada <i>wavelet</i> para um curto-circuito interno ao barramento.	58
5.13	Avaliação das lógicas de <i>trip</i> para: (a) falta interna; (b) falta externa com saturação de TC.	59
6.1	Diagrama unifilar da configuração com barra dupla com saída de disjuntor simples a 5 chaves.	61
6.2	Análise da variação paramétrica em curto interno com elementos diferenciais : (a) <i>wavelet</i> (b) Escala.	65

6.3	Comparação da resposta em frequência dos filtros de diferentes <i>wavelet</i> mãe. . .	66
6.4	Análise da influência da variação da <i>wavelet</i> mãe, curto interno, elementos diferenciais : (a) <i>wavelet</i> (b) escala.	67
6.5	Comparação dos transitórios gerados para diferentes <i>wavelet</i> mãe, elemento diferencial <i>wavelet</i> da TWDR : (a)db4 ; (b)db12.	68
6.6	Análise da influência da variação da taxa de amostragem em curto interno, elementos diferenciais: (a) <i>wavelet</i> (b) Escala.	69
6.7	Comparação dos transitórios gerados para diferentes taxas de amostragem, elementos diferenciais wavelet : (a) 64 amostras/ciclo; (b) 1024 amostras/ciclo. . .	69
6.8	Caso 1, Energias dos elementos diferenciais <i>wavelet</i> : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2. . .	72
6.9	Caso 1, Energias dos elementos diferenciais escala : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2. . .	73
6.10	Tempo de atuação durante a análise de sensibilidade paramétrica do caso 1, variação do ângulo de incidência da falta : (a) 1-de-1 <i>w</i> ; (b) 1-de-1 <i>v</i>	74
6.11	Histograma de frequência relativa do tempo de atuação pela lógica 1-de-1 para variações de angulo de incidência durante um curto interno: (a) Coeficientes <i>wavelet</i> ; (b) coeficientes escala.	75
6.12	Histograma de frequência relativa à atuação 1-de-1 pelo elemento diferencial escala da Z_1 durante um curto interno.	76
6.13	Caso 2, Energias dos elementos diferenciais <i>wavelet</i> : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2. . .	77
6.14	Caso 2, Energias dos elementos diferenciais escala : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2. . .	77
6.15	Caso 3, Energias dos elementos diferenciais <i>wavelet</i> : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2. . .	78
6.16	Caso 3, Energias dos elementos diferenciais escala : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2. . .	79
6.17	Caso 4, energias dos elementos diferenciais <i>wavelet</i> : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2. . .	80
6.18	Caso 4, energias dos elementos diferenciais escala : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2. . . .	81
6.19	Caso 5, energias dos elementos diferenciais da zona 1, : (a) <i>wavelet</i> ; (b) Escala. . .	82
6.20	Caso 6, energias dos elementos diferenciais da zona 1: (a) <i>wavelet</i> ; (b) escala. . .	83

6.21	Tempo de atuação durante a análise de sensibilidade paramétrica do caso 6, variação do ângulo de incidência da falta na fase A : (a) 2-de-2 w ; (b) 2-de-2 v .	85
6.22	Tempo de atuação durante a análise de sensibilidade paramétrica do caso 6, variação do ângulo de incidência da falta interna na fase B : (a) 2-de-2 w ; (b) 2-de-2 v .	85
6.23	Histograma de frequência relativa do tempo de atuação pela lógica 2-de-2, coeficientes <i>wavelet</i> , para variações de angulo de incidência durante um curto evolutivo: (a) Fase A; (b) Fase B.	86
6.24	Histograma de frequência relativa do tempo de atuação pela lógica 2-de-2, coeficientes escala, para variações de angulo de incidência durante um curto evolutivo: (a) Fase A; (b) Fase A.	87
6.25	Diagrama unifilar da configuração barra dupla com saída com disjuntor simples a 5 chaves, proteção transferida do DJLT3 par DJIB.	88
6.26	Caso 7, Corrente pelos disjuntores : (a) DJIB ; (b) DJLT3.	89
6.27	Caso 7, Curto-Circuito interno proteção transferida, elementos diferenciais: (a) Wavelet ; (b) Escala.	89
6.28	Comparação esquemas de proteção durante um curto interno : (a) 87BW ; (b) 87B.	90
6.29	Comparação esquemas de proteção durante um curto evolutivo: (a) 87BW ; (b) 87B.	91

LISTA DE TABELAS

2.1	Identificação de um vão e sua respectiva zona de proteção.	18
2.2	Lógica de trip dos disjuntores.	18
2.3	Estados lógicos dos <i>flags</i> de habilitação de corrente, considerando o paralelismo de barras.	20
2.4	Lógica de <i>trip</i> dos disjuntores.	20
2.5	Estados lógicos dos <i>flags</i> de habilitação de corrente, considerando o paralelismo de barras e o efeito do acoplamento mutuo de sequência zero.	21
2.6	Estado de contatos auxiliares 89A e 89B	23
4.1	Resumo dos trabalhos referentes ao trabalho de pesquisa.	44
6.1	Parâmetros das linhas de transmissão.	61
6.2	Parâmetros dos transformadores de potência.	61
6.3	Parâmetros dos equivalentes remotos.	61
6.4	Representação dos estados lógicos nas figuras de estudo de caso.	63
6.5	Cenários de falta avaliados.	64
6.6	Dados usados na análise da variação paramétrica.	65
6.7	Influência da variação da <i>wavelet</i> mãe, em curto interno.	68
6.8	Influência da variação da taxa de amostragem, curto interno.	70

LISTA DE SÍMBOLOS

\mathcal{A}_j	Matriz dos coeficientes escala da TWDR no j-ésimo nível de resolução.
\mathcal{B}_j	Matriz dos coeficientes <i>wavelet</i> da TWDR no j-ésimo nível de resolução.
AC/DC	Conversor AC/DC.
AMR	Análise Multiresolução.
B_1	Barramento 1.
B_2	Barramento 2.
Coif	Wavelet mãe Coiflets.
db	Wavelet mãe daubechies.
$d\mathcal{E}_{res}^*/dt$	Taxa de variação da energia de restrição suavizada.
di_{res}^*/dt	Taxa de variação da corrente de restrição suavizada.
\mathcal{E}_{op}	Valor do elemento instantâneo de energia de operação.
\mathcal{E}_{res}	Valor do elemento instantâneo de energia de restrição.
\mathcal{E}_{res}^*	Valor do elemento instantâneo de energia de restrição suavizada.
DT	Detecção de Transitórios
FE	Falta Externa
FEW	Detecção de falta externa elementos diferenciais <i>wavelet</i>
FEV	Detecção de falta externa elementos diferenciais escala
F_{SE}	Fator de sensibilidade
f_S	Frequência de amostragem do sinal

g_j	Filtro passa-baixas espelhado em quadratura.
g_l	l-ésimo coeficiente do filtro escala da TWDR.
\tilde{g}_l	l-ésimo coeficiente do filtro escala da TWD.
h_j	Filtro passa-altas espelhado em quadratura.
h_l	l-ésimo coeficiente do filtro <i>wavelet</i> da TWDR.
\tilde{h}_l	l-ésimo coeficiente do filtro <i>wavelet</i> da TWD.
Hz	Hertz.
i_{min}	Valor da corrente instantânea mínima de operação.
i_{prim}	Valor da corrente instantânea do lado primário do TC.
i_{sec}	Valor da corrente instantânea do lado secundário do TC.
i_{op}	Valor do elemento instantâneo de corrente de operação.
i_{res}	Valor do elemento instantâneo de corrente de restrição.
i_{res}^*	Valor do elemento instantâneo de corrente de restrição suavizada.
j	j-ésimo nível de resolução.
JT	Janela de contagem de tempo lógicas de atuação 1-de-1 e 2-de-2.
JTE	Janela de contagem de tempo falta externa.
k	k-ésimo instante de amostragem.
k_s	limiar comparação da corrente taxa de variação da corrente de restrição.
L	Número de coeficientes da transformada wavelet.
\tilde{l}_j	Número de Coeficientes dos filtros wavelet e escala no j-ésimo nível de resolução da TWDR.
M	Inclinação reta que define decaimento da energia de restrição suavizada .
ms	milissegundo.
N	Número de amostras.
P	Número de terminais ou vãos conectados ao barramento.

Q	Janela para cálculo da energia dos coeficientes <i>wavelet</i> e escala.
RTC	Relação de transformação do transformador de corrente.
RTC_{TCMAX}	Relação de transformação do transformador de corrente mais alta.
RTC_p	Relação de transformação do transformador de corrente do Terminal p .
PB	Condição de paralelismo de barras.
pu	Por unidade.
R_{falta}	Resistência de falta.
S	Potencia dos transformadores do sistema.
Sym	Wavelet mãe Symlet.
SLP	Slope, ajuste de sensibilidade do relé percentual.
TAP	Fator de normalização das correntes dos secundários dos TCs.
t_{falta}	Tempo de aplicação da falta.
t_{tran}	Tempo trânsito da menor linha conectada no barramento.
t_{trip}	Tempo de atuação da proteção, envio de trip do relé ao disjuntor.
TF	Transformada de Fourier.
v	Coefficientes escala.
V_j	Vetor de coeficientes escala do j -ésimo nível de resolução.
W_j	Vetor de coeficientes <i>wavelet</i> do j -ésimo nível de resolução.
w	Coefficientes <i>wavelet</i> .
x	Sinal original ao qual será aplicada a transformada <i>wavelet</i> .
X	Sinal no domínio discreto.
Z_1	Zona 1.
Z_2	Zona 2.
Z_{12}	Zona 12, check-zone.

1-de-1	Lógica de atuação 1-de-1.
2-de-2	Lógica de atuação 2-de-2.
87	Função diferencial.
87T	Proteção diferencial de transformador.
87B	Proteção diferencial de barramento.
87L	Proteção diferencial de linha de transmissão.
η_{SM}	Fator sensibilidade sensível a ruídos dos sinais.
δ	Margem de segurança entre pulsos lógica 2-de-2.
$\delta\mathcal{E}_{res}^*$	Razão entre amostras final e inicial da janela de energia de restrição suavizada.
Δ_{CURT}	Janela de amostras curta.
Δ_{LONG}	Janela de amostras longa.
Δt	Intervalo de tempo entre amostras.
ϕ	Fase A, B ou C.
τ	Constante de tempo de decaimento da componente DC de um sinal.

GLOSSÁRIO

ABB	ASEA Brown Boveri
AC	Alternating Current
AMR	Análise multiresolucional
ANSI	American National Standards Institute
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CS	Chave seccionadora
DC	<i>Direct Current</i>
DJ	Disjuntor
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LKC	Lei de Kirchhoff das Correntes
LT	Linha de Transmissão
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RMS	<i>Root-Mean-Square</i>
SE	Subestação
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de corrente
TCB	Transformador de corrente proteção de barras

TDD	Transferência de disparo direto
TF	Transformador de potência
TP	Transformador de potencial
TPC	Transformador de potencial capacitivo
UnB	Universidade de Brasília
TWC	Transformada Wavelet Contínua
TWD	Transformada Wavelet Discreta
TWDR	Transformada Wavelet Discreta Redundante
TWP	Transformada Wavelet Packet

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Em decorrência da expansão dos sistemas elétricos de potência que vem sendo verificada ao longo das últimas décadas, tem-se verificado cada vez mais a necessidade de sistemas confiáveis de transmissão e distribuição de energia elétrica. Além disso, a redução do número e duração de blecautes bem como a proteção dos usuários do sistema e dos equipamentos a este conectados se tornaram tópicos prioritários para as atividades das concessionárias. Para atender essa demanda crescente por energia elétrica, muitos elementos dos sistemas de potência têm sido renovados, a exemplo dos relés de proteção, cujas versões analógicas têm sido substituídas pelos relés numéricos digitais. Com isso, tornou-se possível a elaboração de técnicas mais sofisticadas de proteção, capazes de reduzir os tempos de operação dos relés para valores menores que um período da frequência fundamental.

Nos sistemas elétricos de potência, os barramentos das subestações de energia (SEs) são normalmente classificadas como um dos elementos mais importantes, pois consistem no ponto de conexão de um grande número de elementos das redes elétricas, a exemplo de linhas de transmissão, transformadores, geradores, entre outros. Em consequência disso, ao passo que os barramentos devem ser protegidos contra distúrbios internos a eles, a operação destes não deve ser afetada em casos de defeitos externos, evitando-se desligamentos desnecessários, o que poderia culminar em blecautes de grandes proporções (EISSA, 2004; MOHAMMED, 2005; PEREIRA *et al.*, 2014).

Dentre os distúrbios em sistemas elétricos de potência, os curtos-circuitos são considerados como os mais preocupantes para as concessionárias de energia elétrica, visto que resultam em situações perigosas para o sistema e para os consumidores. Assim, um barramento deve contar com esquemas de proteção robustos, que atuem rapidamente para isolar curtos-circuitos por

meio da abertura dos disjuntores dos vãos a ele conectados (VIANNA, 2013). Por isso, ao longo dos anos, várias soluções têm sido estudadas com o objetivo de viabilizar atuações mais rápidas e seguras dos relés de proteção, a fim de evitar ao máximo que os equipamentos conectados aos barramentos sejam deteriorados devido aos altos níveis das correntes de curto-circuito.

De acordo com os procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), cada barramento pertencente ao SIN deve ter ao menos um conjunto de proteção unitária segregada por fases, que pode ser baseada no princípio diferencial de baixa ou de alta impedância, ou na comparação direcional de fases (ONS, 2011). Contudo, há instalações mais antigas nas quais não são utilizadas proteções unitárias para as barras. Nesses casos, a proteção é feita com as unidades gradativas das proteções de linhas adjacentes (ABB, 1999). Consequentemente, faltas no barramento só serão extintas após o tempo de coordenação de segunda zona, o que pode não ser tolerável a depender da importância da subestação para o SIN.

Dentre as funções de proteção unitárias comumente utilizadas em barramentos, aquela mais empregada é a diferencial de baixa impedância, sobretudo com o advento dos relés numéricos microprocessados. A função diferencial de baixa impedância proporciona vantagens frente aos demais tipos de função de proteção unitária, como o uso de zonas lógicas adaptativas e a possibilidade de instalação distribuída da proteção, mediante o uso de *bay units*, facilitando a inclusão de novos vãos ao barramento (ALSTOM GRID, 2011).

Muito embora as funções de proteção baseadas em fasores fundamentais sejam as tradicionalmente utilizadas pelas concessionárias, os avanços tecnológicos recentes têm permitido a elaboração de técnicas mais sofisticadas para fins de redução dos tempos de atuação das proteções, a exemplo das funções baseadas na teoria da transformada *wavelet*. Comparada com as técnicas que aplicam a transformada de Fourier, a transformada *wavelet* possui maior flexibilidade durante a análise de diferentes faixas de frequência dos sinais monitorados, viabilizando a análise de componentes de alta frequência de forma segura e confiável em procedimentos de proteção de sistemas elétricos. A inserção dessas ferramentas em equipamentos de proteção de sistemas de potência tem se tornado cada vez mais realidade, especialmente com o advento das funções de proteção aplicadas no domínio do tempo, sendo, portanto, uma opção muito interessante para os sistemas elétricos modernos, bem como para os fabricantes de relés. Usando este tipo de função, os tempos de operação dos relés durante a proteção de subestações podem

ser significativamente reduzidos, atingindo a ordem de microssegundos.

1.2 MOTIVAÇÃO

Garantir a o fornecimento energia em todo o sistema de potência sempre será um desafio para as empresas concessionárias. De maneira geral, a modo de manter o sistema operando continuamente a integridade das subestações deve ser preservada, devido a que estas são pontos do sistema que interconectam varias regiões e o desligamento devido a faltas pode levar à perda de muitas outras cargas que não deveriam ser desconectadas, prejudicando a comunidade que devem assumir as perdas econômicas pela não prestação dos seus serviços. Cabe salientar que, os barramentos são muito susceptíveis a ser sometidos a altas correntes de curto circuito durante faltas neles, por isso, esse tipos de perturbações no sistema devem ser isoladas rapidamente para evitar danificar equipamentos, que no caso que aconteçam, também serão compromissos econômicos a serem assumidos pelos consumidores. Neste contexto, sabe-se que os tempos de operação das funções tradicionais baseadas em fasores fundamentais variam normalmente de 1 a 2 ciclos (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010; PEREIRA *et al.*, 2014).

Com o objetivo de melhorar o desempenho dos esquemas de proteção, a utilização de métodos matemáticos para análise dos sistemas de potência tem sido cada vez mais comum no desenvolvimento de novas soluções em proteção. No caso deste trabalho, busca-se avaliar esse tipo de ferramentas em subestações por meio de um esquema diferencial. A proteção diferencial de barramentos é uma proteção que tem sido pouco estudada, talvez pela complexidade relacionada à grande quantidade de equipamentos associados. Este trabalho, complementado com as publicações relacionadas, buscam apoiar as pesquisas da proteção diferencial de baixa impedância no domínio do tempo, as quais sempre têm como objetivo principal aprimorar implementações baseadas em ferramentas matemáticas que melhorem o desempenho dos relés de proteção.

1.3 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo geral desta dissertação é propor e desenvolver um modelo de proteção diferencial de barramentos de baixa impedância, mapeando os conceitos fundamentais da proteção diferencial tradicional para o domínio da transformada *wavelet*, com o interesse de obter tempos de atuação rápidos mantendo o desempenho e seletividade equivalentes aos relés convencionais.

Podem-se elencar os objetivos específicos:

- Empregar as lógicas de proteção e seleção adaptativa de zonas que têm sido usadas em relés numéricos de proteção de barramento disponíveis no mercado;
- Implementar uma metodologia para análise de sensibilidade paramétrica da função de proteção proposta, determinando as taxas de amostragem e *wavelet* mãe mais adequadas para o algoritmo proposto;
- Identificar situações adversas para a função de proteção proposta, especialmente aquelas relacionadas com o amortecimento dos transitórios;
- Validar o desempenho do esquema de proteção proposto por meio de casos pontuais.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

As principais contribuições da dissertação são:

- Desenvolvimento de uma proteção diferencial de barramentos robusta, que utiliza as energias dos coeficientes *wavelet* e escala de forma complementar, permitindo a operação da proteção com qualquer um dos coeficientes em tempos muito curtos durante faltas internas ao barramento, mesmo para configurações de barramento complexas;
- Elaboração de um esquema de proteção imune a faltas externas com elevado nível de saturação de TCs e faltas evolutivas, os quais consistem em casos pouco reportados e avaliados na literatura verificando a robustez do esquema e tornando-o mais desafiador para avaliação dessas situações adversas;
- Mapeamento de lógicas de operação empregadas em relés disponíveis no mercado para o domínio *wavelet*, conferindo segurança e velocidade ao algoritmo proposto;
- Implementação de um esquema de proteção diferencial de barramentos que oferece baixo

esforço computacional, tornando-o aplicável em tempo real.

- Aplicabilidade de elevadas taxas de amostragem no relé sem perder seletividade na operação em tempo real.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho de dissertação está organizado com a seguinte estrutura de capítulos:

- No Capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica da proteção diferencial de barramentos, abordando os aspectos básicos, as diferenças, vantagens e desvantagens de usar elementos instantâneos ao invés dos filtrados. Além disso, apresenta-se a definição de zonas de proteção adaptativas e as lógicas de atuação 1-de-1 e 2-de-2.
- No Capítulo 3, aborda-se a fundamentação teórica da transformada *wavelet*, revisando conceitos utilizados na elaboração do algoritmo de proteção proposto.
- No Capítulo 4, apresenta-se um levantamento do estado da arte relacionado às implementações existentes de funções de proteção de barramentos, sejam elas baseadas nos conceitos tradicionais que usam fasores fundamentais ou em técnicas sofisticadas de filtragem como a transformada *wavelet*.
- No Capítulo 5, descreve-se a implementação do esquema de proteção proposto, explicando o algoritmo por meio de um diagrama de blocos e apresentando o mapeamento da função diferencial tradicional no domínio *wavelet*. Para tanto, definem-se as etapas de normalização dos sinais, detecção de distúrbios, detecção de faltas por meio das lógicas de atuação 1-de-1 e 2-de-2, detecção de faltas externas e geração de comando de *trip* para os disjuntores do sistema.
- As análises dos resultados para diversos tipos de faltas internas ou externas são apresentadas no Capítulo 6.
- No Capítulo 7, apresentam-se as conclusões sobre os resultados obtidos e propostas para trabalhos futuros.

1.6 PUBLICAÇÕES EFETUADAS

No que concerne à divulgação dos estudos realizados ao longo da dissertação, enumeram-se as seguintes publicações:

1. *Fundamentals of Instantaneous-Values-based Busbar Differential Protection*, apresentado no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, realizado em Natal-RN em Maio 2016.
2. *Proteção Diferencial de Barramentos Baseada no Plano Alfa Generalizado*, apresentado no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, realizado em Natal-RN em Maio 2016.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BAIXA IMPEDÂNCIA DE BARRAMENTOS

De um modo geral, o sistema de proteção de barramentos deve satisfazer os seguintes requisitos (ABB, 1999):

- Deve ter atuação rápida;
- Deve ser capaz de detectar faltas internas;
- Deve ser absolutamente estável para faltas externas, que possam levar à saturação do núcleo magnético dos TCs do vão defeituoso;
- Deve ser capaz de detectar e isolar somente o trecho do sistema afetado pela falta;
- Deve ser segura contra operações indevidas devido às falhas de contatos auxiliares, erros humanos, faltas nos circuitos secundários, etc.

Neste capítulo, são apresentados os fundamentos da proteção diferencial de barramentos, em particular aqueles que dizem respeito à proteção diferencial de baixa impedância, os quais deram subsídio ao desenvolvimento do presente trabalho.

2.1 PROTEÇÃO DIFERENCIAL NUMÉRICA DE BAIXA IMPEDÂNCIA

A função de proteção diferencial numérica de baixa impedância recebe essa denominação pelo fato da impedância imposta pelo relé no secundário do TC ser pequena, de modo a minimizar a saturação do seu núcleo magnético. Ela, na verdade, implementa o princípio da proteção diferencial percentual, utilizado desde os relés eletromecânicos (ANDERSON, 1999).

Quando aplicada na proteção de barramentos, a função diferencial de baixa impedância (código IEEE/ANSI 87B) pode ser implementada basicamente de duas formas, a saber: baseada

nos fasores corrente (denominada de função 87B filtrada) ou nos valores instantâneos das correntes (denominada de função 87B instantânea). Todavia, como normalmente são requeridas atuações rápidas da proteção de barramento, a maioria dos fabricantes opta pelo uso da função 87B baseada nos valores instantâneos das correntes (ZIEGLER, 2012).

A função de proteção diferencial de baixa impedância está fundamentada na lei das Correntes de Kirchhoff (LCK), como ilustrada na Figura 2.1, na qual o somatório das correntes que entram ou saim de um nó (neste caso o nó representando um barramento) vai ser igual a zero (BEHRENDT *et al.*, 2010).

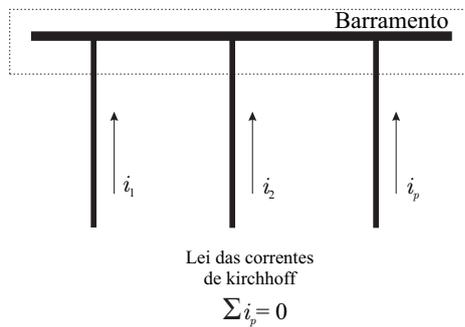


Figura 2.1. Lei das correntes de Kirchhoff aplicada a um barramento.

A operação da função 87B baseada nos valores instantâneos das correntes se baseia na comparação de uma corrente de operação (i_{op}) e uma corrente de restrição (i_{res}), as quais são normalmente definidas pelas Equações 2.1 e 2.2 (ZIEGLER, 2012):

$$i_{op} = \left| \sum_{p=1}^P i_p \right|, \quad (2.1)$$

$$i_{res} = \sum_{p=1}^P |i_p|, \quad (2.2)$$

sendo P o número de vãos conectados ao barramento e i_p o valor instantâneo de corrente do p -ésimo vão.

No caso de operação normal do sistema, ou na presença de uma falta externa, os valores de i_{op} são idealmente zero, enquanto que i_{res} vai ser aproximadamente igual ao valor de corrente que circula pelo barramento. Por outro lado, para o caso de faltas internas i_{op} e i_{res} têm aproximadamente o mesmo valor, como é mostrado na Figura 2.2. Uma falta interna é detectada quando as seguintes condições forem satisfeitas:

$$i_{op} > i_{min} \quad \text{e} \quad i_{op} > SLP \cdot i_{res}, \quad (2.3)$$

sendo i_{min} o valor da corrente mínima de operação e SLP (do inglês *slope*) uma constante de proporcionalidade, que assume, tipicamente, valores menores e iguais a 1 (um).

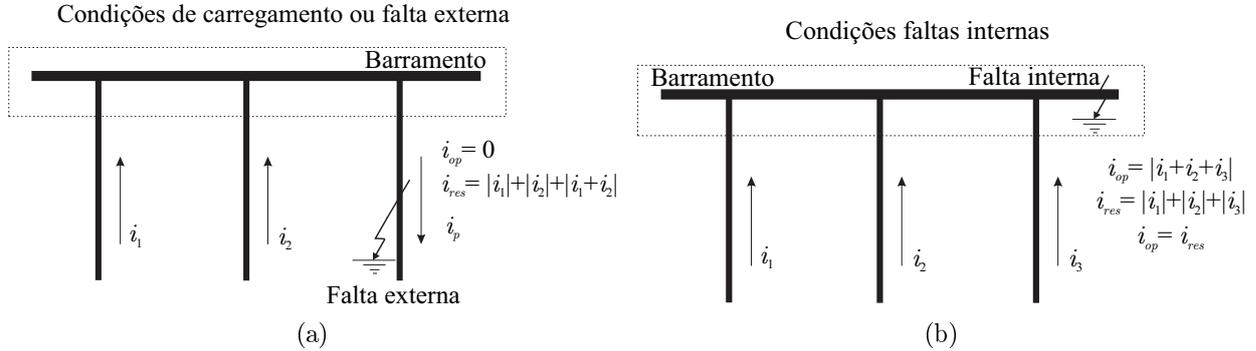


Figura 2.2. Cálculo das correntes de operação e restrição : (a) Falta externa ; (b) Falta interna.

O valor de i_{min} permite prevenir atuações indevidas para variações das correntes de carga, erros na medição dos TCs, transitórios gerados por desligamentos ou religamentos, erros de transformadores auxiliares ou de tensão, etc (BEHRENDT *et al.*, 2010). Por outro lado, SLP está relacionado com a sensibilidade do relé, de modo que para valores de SLP pequenos o relé aumenta sua sensibilidade. Na Figura 2.3, ilustra-se a comparação de i_{op} e i_{res} para dois fatores de SLP . Para um SLP de 0,3, as condições de operação descritas na Equação (2.3) serão satisfeitas mais rapidamente do que no caso em que o SLP é 0,7, já que no segundo caso a região de restrição é maior.

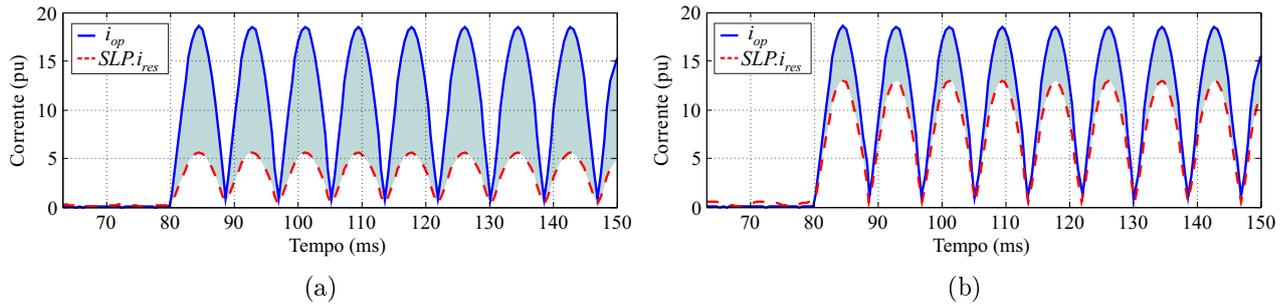


Figura 2.3. Influência do valor de SLP na sensibilidade do relé: (a) $SLP = 0,3$ (relé mais sensível); (b) $SLP = 0,7$ (relé menos sensível).

2.1.1 Corrente de Restrição Suavizada

A fim de evitar operações indevidas do esquema de proteção diferencial, faz-se necessário que i_{res} mantenha um comportamento estável e sem oscilações durante condições de faltas externas com saturação dos TCs. Neste caso, os valores de i_{op} são quase nulos até o instante

imediatamente anterior ao núcleo magnético do TC saturar, mas podem ultrapassar os valores de i_{res} nos intervalos de tempo nos quais ele estiver saturado, como é ilustrado na Figura 2.4. Esses intervalos podem levar à operações indevidas do esquema de proteção, já que o relé pode interpretar as elevações dos valores de i_{op} como condições de faltas internas. A depender do instante de ocorrência da falta, a componente DC de decaimento exponencial da corrente de falta tem um valor elevado, acarretando mais facilmente na saturação do núcleo dos TCs (ZIEGLER, 2012). Nesse sentido, se as condições da Equação (2.3) são satisfeitas e não existe uma lógica auxiliar de detecção de falta externa, o relé pode operar de forma indevida. Para contornar tal situação, a maioria dos fabricantes aplica a estratégia sugerida por Ziegler (2012), Kumar & Hansen (1993) para suavizar os valores de corrente de restrição (agora identificada como i_{res}^*), na qual o valor de i_{res} é sustentado por uma função exponencial que emula o comportamento de carga e descarga lenta de um capacitor em um conversor AC/DC, conforme ilustrado na Figura 2.4.

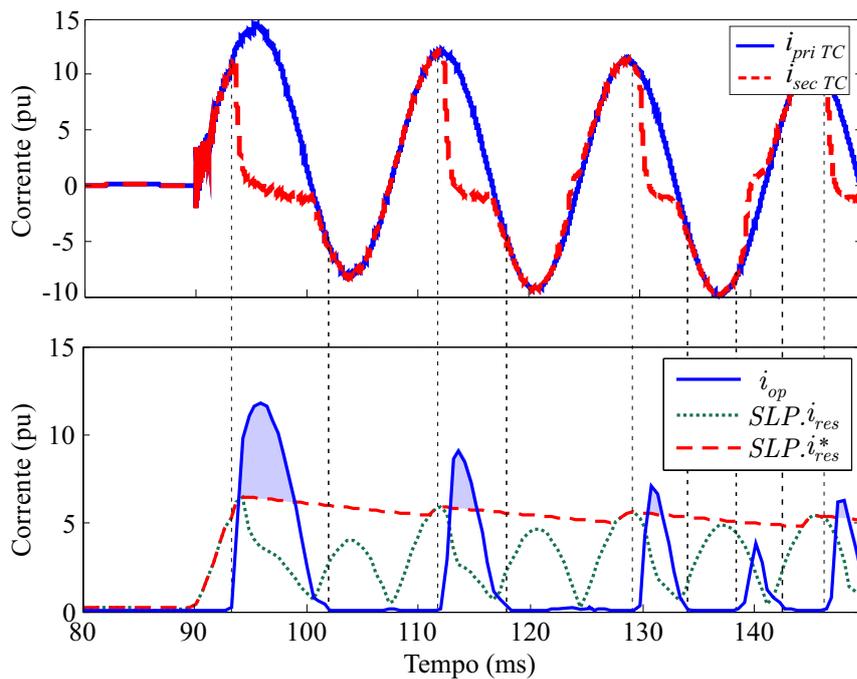


Figura 2.4. Influência da saturação de TC nas formas de onda das energias .

A fim de melhor entender a formação da corrente i_{res}^* , faz-se uma analogia com o funcionamento do circuito elétrico ilustrado na Figura 2.5, o qual é constituído por uma fonte, um diodo, um capacitor e um resistor de carga. A linha tracejada representa a forma de onda da tensão da fonte e a linha contínua a tensão através do resistor. No primeiro ciclo o diodo está habilitando o passo de corrente desde $t = 0$ até $t = t_A$. Nesse momento o diodo não conduz, fa-

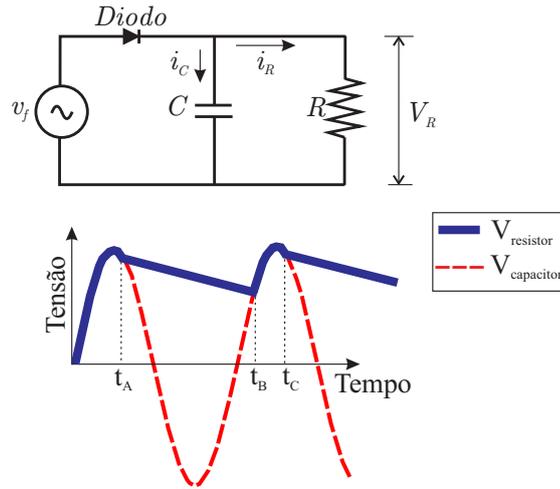


Figura 2.5. Circuito para exemplificar processo de carga e descarga de um capacitor.

zendo com que a potência requerida pelo resistor seja fornecida pelo capacitor até sua descarga. Em $t = t_B$ o diodo é ativado novamente até o tempo $t = t_C$ quando o capacitor fica novamente carregado. Os instantes em que o diodo permite o fornecimento de corrente é quando a tensão da fonte é igual à tensão do resistor. A corrente i_{res}^* possui o mesmo comportamento descrito para a tensão no resistor do circuito ilustrado na Figura 2.5.

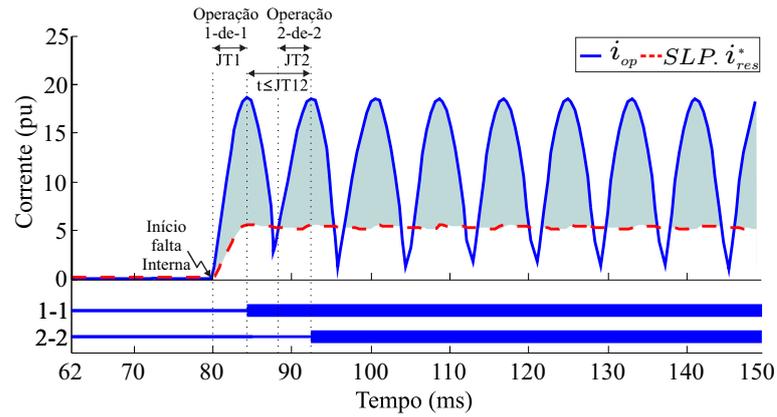
2.2 LÓGICAS DE *TRIP* 1-DE-1 E 2-DE-2

Utilizando-se a corrente de restrição suavizada i_{res}^* , as condições de operação da função 87B descritas na Equação 2.3 passam a ser:

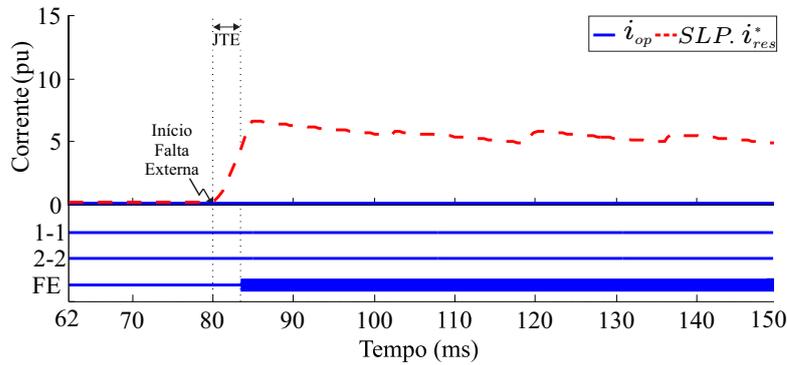
$$i_{op} > i_{min} \quad \text{e} \quad i_{op} > SLP \cdot i_{res}^* . \quad (2.4)$$

Nos relés numéricos de proteção de barramento, essa comparação é feita, tipicamente, por meio das lógicas auxiliares 1-de-1 ou 2-de-2 (do inglês *1-out-of-1* e *2-out-of-2*) (ZIEGLER, 2012; KUMAR; HANSEN, 1993; FUNK; ZIEGLER, 1997). Essas lógicas comparam i_{op} e i_{res}^* dentro de janelas de contagem de tempo (JT), que se iniciam a partir do primeiro instante que i_{op} passa a ser maior que $SLP \cdot i_{res}^*$, conforme é mostrado na Figura 2.6.

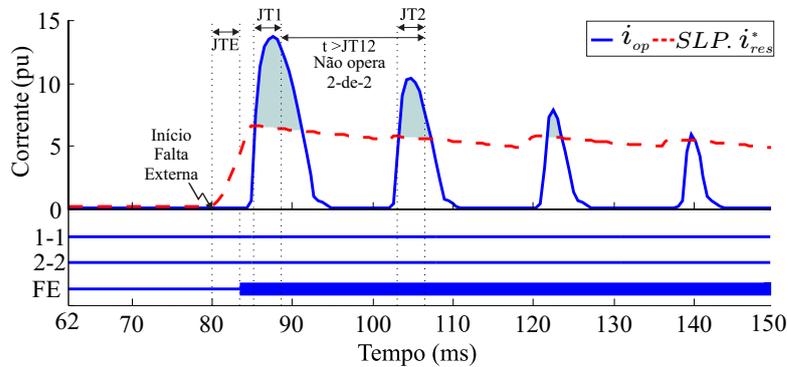
Para o melhor entendimento do uso das lógicas 1-de-1 e 2-de-2, recorre-se ao diagrama de blocos ilustrado na Figura 2.7 (ZIEGLER, 2012). Basicamente, a lógica 1-de-1 (denominada modo de operação rápido) é ativada quando as condições da Equação (2.4) são satisfeitas imediatamente após início da falta e a taxa de variação di_{res}^*/dt é positiva e maior que um



(a)



(b)



(c)

Figura 2.6. Avaliação das lógicas de *trip* para: (a) uma falta interna; (b) uma falta externa sem saturação de TC; (c) uma falta externa com saturação de TC.

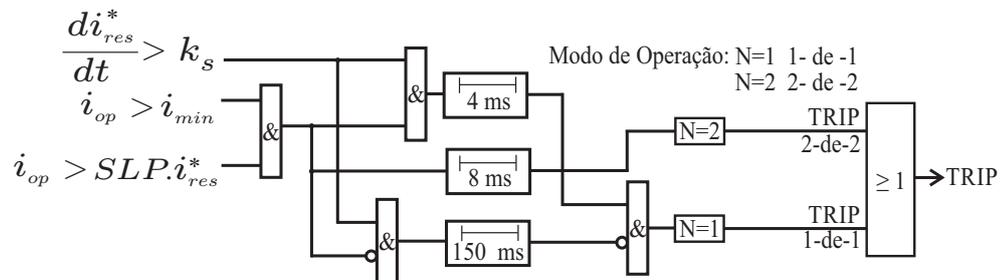


Figura 2.7. Diagrama de blocos das lógicas de *trip* 1-de-1 e 2-de-2 (ZIEGLER, 2012).

limiar k_s , o que deve ocorrer para faltas internas à zona de proteção. Nessa condição, tanto i_{res}^* quanto i_{op} aumentam seus valores simultaneamente, mas como i_{res}^* é multiplicada pelo fator SLP , os valores de i_{op} serão maiores e o contador de tempo será habilitado, como ilustrado na Figura 2.6(a). Se o contador de tempo verifica que i_{op} permanece acima de i_{res}^* em pelo menos 4 ms consecutivos após o início da falta, uma janela de tempo JT1 é contabilizada, de modo que o comando de abertura pode ser enviado para os disjuntores associados à zona de proteção defeituosa em 4 ms após a ocorrência da falta (VÁSQUEZ *et al.*, 2016).

A lógica 2-de-2, por sua vez, deve operar se as condições estabelecidas na Equação (2.4) são satisfeitas por dois semi-ciclos consecutivos. Essa lógica garante principalmente a detecção de faltas evolutivas¹ e evita falsas operações da proteção durante faltas externas com elevada saturação de TC (KUMAR; HANSEN, 1993). Basicamente, alguns instantes após a janela de tempo JT1 ter sido contabilizada, os valores de i_{op} passam a ser menores que i_{res}^* , não mais satisfazendo as condições da Equação (2.4). Contudo, as condições de operação podem voltar a ser satisfeitas, assim como di_{res}^*/dt pode voltar a ser positiva e maior que o limiar k_s , iniciando uma nova contagem de tempo. Se essa condição se mantiver novamente por 4 ms, uma segunda janela de tempo JT2 é contabilizada. Então, verifica-se o intervalo de tempo entre as contagens de JT1 e JT2. Caso esse intervalo seja menor ou igual a 8 ms, duas contagens consecutivas são verificadas e, portanto, a lógica 2-de-2 é ativada, podendo resultar no comando de abertura dos disjuntores associados à zona de proteção defeituosa (VÁSQUEZ *et al.*, 2016).

No caso de faltas externas, como ilustrado na Figura 2.6(b), verifica-se que i_{res}^* aumenta, a ponto de que a taxa de variação di_{res}^*/dt passa a ser positiva e maior que o limiar k_s , enquanto que i_{op} permanece com valores aproximadamente iguais a zero. Se essa situação se mantiver durante uma janela de tempo JTE (tipicamente com duração de 4 ms), declara-se uma falta externa. Nesse caso, habilita-se o chamado modo de falta externa ou de operação segura por um determinado intervalo de tempo (ajustado tipicamente em 150 ms), durante o qual o *trip* pela lógica 1-de-1 fica bloqueado. Assim, a única forma da proteção operar será por meio da lógica 2-de-2, o que aumenta sobremaneira a confiabilidade da atuação da proteção, evitando atuações indevidas para faltas externas com severa saturação dos TCs e permitindo a correta atuação para faltas que evoluam de externas para internas ao barramento. No primeiro caso,

¹O termo falta evolutiva refere-se aquelas faltas que iniciam fora da zona de proteção, mas que evoluem para componentes internos à zona, podendo afetar a mesma ou outras fases.

verifica-se que as condições da Equação 2.4 são satisfeitas durante os intervalos de tempo de saturação do TC (vide Figura 2.6(c)), mas o intervalo de tempo entre as janelas de tempo JT1 e JT2 é superior a 8 ms, evitando-se uma atuação indevida da proteção.

2.3 DEFINIÇÃO DE ZONAS DE PROTEÇÃO

De um modo geral, quando da aplicação da proteção diferencial aos barramentos, definem-se as chamadas zonas de proteção físicas e lógicas (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009). O primeiro tipo é delimitado pela localização física e pela polaridade dos TCs de cada elemento conectado ao barramento. As zonas lógicas, por sua vez, são definidas com base na localização física e na polaridade dos TCs, assim como no estado lógico dos disjuntores e chaves seccionadoras empregadas no arranjo do barramento. As zonas lógicas são as responsáveis pela definição de quais correntes devem ser consideradas para o cálculo de i_{op} e i_{res} usadas na função diferencial de baixa impedância.

Normalmente, as zonas de proteção físicas e lógicas são coincidentes, mas por vezes faz-se uso de estratégias adaptativas de expansão ou retração das zonas lógicas, afim de melhorar o desempenho do sistema de proteção do barramento como um todo, sobretudo naqueles com topologia que permite o uso de arranjos variáveis (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009).

Para exemplificar a delimitação das zonas de proteção em um barramento com topologia variável, considere como exemplo o barramento com a topologia de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves, ilustrado na Figura 2.8. Cada barramento, Barra 1 (B_1) e Barra 2 (B_2), gera uma zona de proteção, Zona 1 (Z_1) e Zona 2 (Z_2), respectivamente, nas quais serão conectados vãos de elementos do sistema como linhas de transmissão, transformadores de potência, etc.

Em condições normais de operação do sistema, ambos os barramentos permanecem energizados e unidos por um disjuntor de interligação de barras (DJIB). Além disso, a conexão de cada vão a algum dos barramentos é feita por meio de uma chave seccionadora seletora de barras. Como pode-se observar, um vão pode ser alimentado por qualquer uma das barras (ou seja, B_1 ou B_2), bastando apenas manobrar-se adequadamente as chaves seccionadoras seletoras

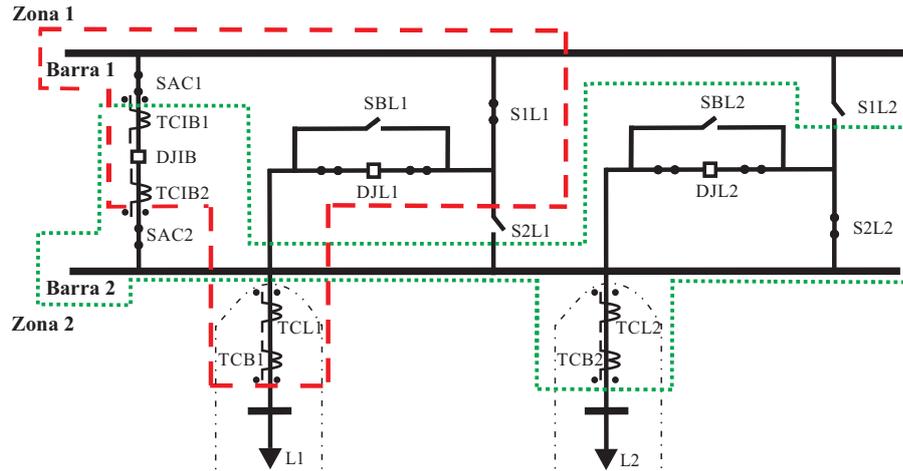


Figura 2.8. Zonas de proteção de barramento duplo.

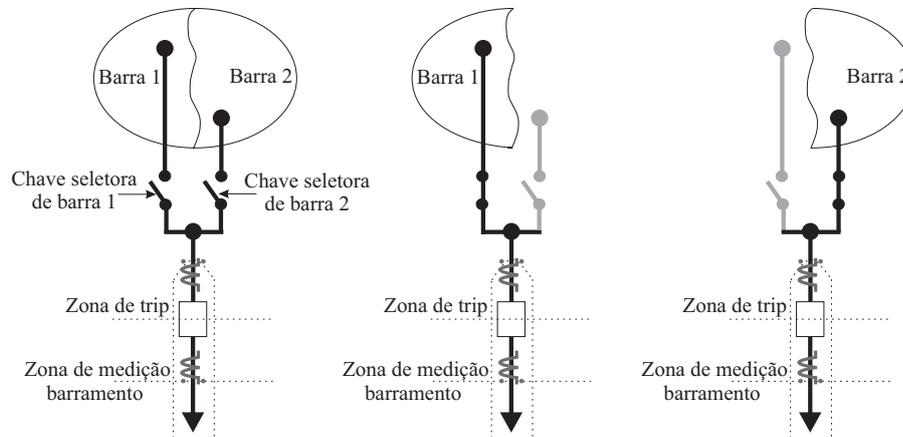


Figura 2.9. Conexão ao barramento, Chave seccionadora seletora de barramento.

de barras, como é ilustrado no exemplo simples da Figura 2.9.

A seleção de zonas² está relacionada diretamente com os estados lógicos dos disjuntores e chaves seccionadoras de cada vão. A combinação desses estados, particularizada para cada tipo de topologia de barramento, define o estado lógico dos chamados *flags* de habilitação de corrente, de modo que as Equações (2.1) e (2.2) devem ser redefinidas como (VIANNA, 2013):

$$i_{op}^Z = \left| \sum_{p=1}^P f_p^Z \cdot i_p \right|, \quad (2.5)$$

$$i_{res}^Z = \sum_{p=1}^P f_p^Z \cdot |i_p|, \quad (2.6)$$

sendo P o número de vãos conectados no barramento; i_{op}^Z e i_{res}^Z as correntes de operação e restrição da zona Z ; e f_p^Z o *flag* de habilitação da corrente do p -ésimo vão na zona Z .

²Entende-se como seleção de zonas a identificação de quais correntes devem ser consideradas na definição das diferentes zonas lógicas empregadas na proteção do barramento.

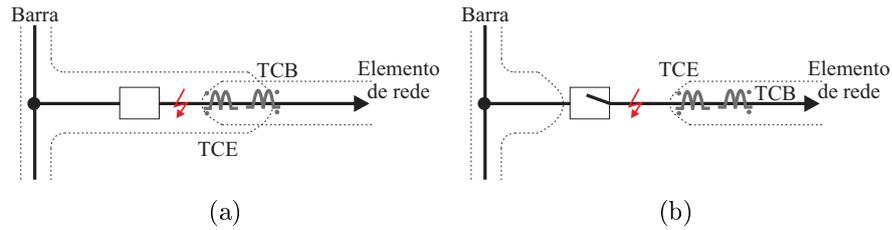


Figura 2.10. Ilustração das zonas de proteção: (a) zonas física e lógica coincidentes; (b) zonas física e lógica diferentes, com a zona lógica contraída.

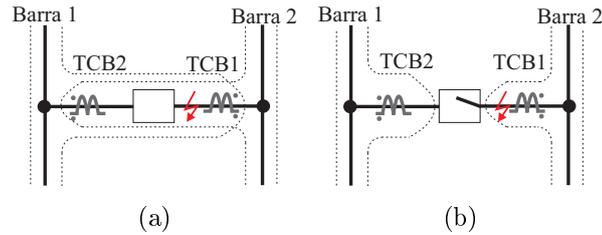


Figura 2.11. Esquemas de proteção no DJIB: (a) com sobreposição de zonas; (b) sem sobreposição de zonas e com a abertura inicial do DJIB.

Comumente, na concepção das proteções empregadas nos diferentes equipamentos instalados nas SEs, são utilizados TCs com vários núcleos de proteção. Além disso, no que diz respeito à proteção de barramentos, normalmente os TCs são instalados entre o elemento de conexão do vão ao barramento (que pode ser um disjuntor ou uma chave seccionadora, a depender do tipo de topologia empregada) e o próprio componente do sistema (linha de transmissão, transformador, etc.), conforme ilustrado na Figura 2.10. Todavia, esta posição dos TCs gera pontos cegos (do inglês *blind spots*) ou zonas mortas (do inglês *dead zones*) para a proteção do vão, no caso de faltas entre o TC e o DJ. Um curto-circuito nessa localização seria detectado apenas pela proteção do barramento, que enviaria um comando de abertura para os disjuntores a ele conectados. Contudo, mesmo com a abertura do disjuntor, a falta não seria extinta, fazendo-se necessário o uso da proteção de zona morta, que, nesse caso, seria responsável pelo envio de uma mensagem de transferência de disparo direto (TDD) à proteção remota do elemento (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009).

Na Figura 2.10 também ilustra-se a formação das zonas de proteção física e lógica. Com o disjuntor fechado, essas zonas são coincidentes (Figura 2.10(a)). Por outro lado, com a abertura do disjuntor providenciada pela proteção do barramento, estrategicamente retira-se a corrente medida pelo TCB da malha diferencial, contraindo-se, assim, a zona lógica do barramento, que passa a ser diferente da zona física que manteve-se inalterada (Figura 2.10(b)).

Do ponto de vista da confiabilidade do sistema de proteção como um todo, a melhor forma

de instalação dos TCs na região de interligação entre barras é a que promove a sobreposição de zonas, conforme ilustrado na Figura 2.11(a). Isso porque ambas as zonas podem detectar curtos-circuitos entre os TCs e o DJIB. Contudo, essa não é boa alternativa do ponto de vista da seletividade, haja visto que são enviados comandos de abertura para todos os disjuntores conectados em ambas as barras. Outra alternativa é identificar que o curto-circuito ocorreu na zona de interseção das zonas, enviando um comando de abertura primeiramente apenas para o DJIB. Assim, após a abertura desse disjuntor, mediante a contração das zonas lógicas, apenas uma das zonas de proteção passaria a enxergar o defeito, providenciando a abertura apenas dos disjuntores conectados à sua barra associada, que nesse exemplo seria a Barra 2. Mantém-se, assim, todos os vãos conectados à Barra 1 ainda em operação, melhorando sobremaneira a seletividade do esquema. Todavia, a adoção dessa alternativa acarreta no aumento do tempo de extinção de curtos-circuitos nos barramentos, o que pode ser um fator proibitivo em sistemas de alta e extra-alta tensão, em virtude das estreitas margens de estabilidade na operação dos sistemas de potência (GUZMÁN *et al.*, 2004).

2.4 LÓGICA DE SELEÇÃO DAS ZONAS DE PROTEÇÃO

Considere o barramento com topologia de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves ilustrado na Figura 2.8, o qual tipicamente requer o uso de duas zonas de proteção, sendo uma para cada uma das barras da topologia. Neste exemplo, o barramento possui dois vãos de linhas de transmissão, cada um deles conectado em uma das barras, de modo que cada vão pertence a uma das zonas de proteção. Além disso, ambas as barras encontram-se energizadas e interligadas via o DJIB. Além disso, verifica-se também que os TCs são conectados de modo a promover a sobreposição das zonas de proteção em torno do DJIB. Os TCs que delimitam a zona de proteção Z_1 são o TCB1 correspondente ao TC do vão 1 e o TCIB2. Por outro lado, os TCs envolvidos na Z_2 são o TCB2 e o TCIB1.

Na Tabela 2.1 é mostrada a designação dos *flags* de habilitação de cada elemento do sistema para realizar uma fácil identificação da zona à qual ele pertence. As correntes medidas nos TCs das linhas L1 e L2 podem ser incluídas no cálculo diferencial da Z_1 ou Z_2 , a depender do estado lógico dos *flags* f_p^1 e f_p^2 , que, por sua vez, dependem do estado das chaves seletoras de barra. Por outro lado, o TCIB1 sempre pertence à zona Z_2 e o TCIB2 à zona Z_1 , conforme apresentado

na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Identificação de um vão e sua respectiva zona de proteção.

Elemento	TC correspondente	f_p^1	f_p^2
L1	TCB1	S1L1	S2L1
L2	TCB2	S1L2	S2L2
DJIB	TCIB1	0	1
	TCIB2	1	0

No caso de uma falta em algum dos barramentos, o comando de abertura por parte da proteção vai ser sempre enviado para os disjuntores dos vãos conectados à barra defeituosa, mantendo-se a barra sã energizada e com todos os seus vãos conectados. Contudo, como um mesmo vão pode ser conectado a qualquer uma das barras, ou seja, pode pertencer a qualquer uma das zonas de proteção, a lógica de *trip* dos disjuntores deve levar em consideração não só as atuações das zonas de proteção diferencial Z_1 e Z_2 , mas também o estado lógico das chaves seccionadoras seletoras de barra, conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Lógica de trip dos disjuntores.

Disjuntor	Expressão Lógica
DJL1	$(Z_1 \text{ AND } S1L1) \text{ OR } (Z_2 \text{ AND } S2L1)$
DJL2	$(Z_1 \text{ AND } S1L2) \text{ OR } (Z_2 \text{ AND } S2L2)$
DJIB	$Z_1 \text{ OR } Z_2$

2.4.1 Transferência da Proteção

Em caso de necessidade de manutenção do disjuntor de algum vão, este deve ser isolado através da abertura das suas chaves seccionadoras de isolamento. Mas, antes disso, para que o componente continue sendo alimentado, fecha-se sua seccionadora de *bypass*. Neste caso, deve-se deixar apenas o vão cujo disjuntor está em manutenção conectado a uma das barras, que funcionará como barra de transferência, e remanejar todos os outros vãos para a outra barra, que opera como barra principal. Além disso, é necessário transferir o comando de *trip* do disjuntor em manutenção para o DJIB. Assim, uma falta no vão cujo disjuntor está em manutenção ou na barra de transferência deve ser extinta mediante a abertura do DJIB e do disjuntor no terminal remoto do vão, cuja lógica de *trip* não é aqui analisada.

Dadas essas possibilidades de mudança no sistema, é preciso incluí-las na lógica de *trip* dos disjuntores. Para isso, utiliza-se a variável lógica auxiliar PB , que indica se há paralelismo entre as Barras 1 e 2, ou seja, se algum dos componentes está sendo remanejado e momentaneamente possui as duas chaves seccionadoras seletoras de barra fechadas. Assim, o estado lógico de PB pode ser definido pela seguinte expressão lógica:

$$PB = [(S1L1 \text{ AND } S2L1) \text{ OR } (S1L2 \text{ AND } S2L2)] \text{ AND } DJIB. \quad (2.7)$$

Durante a situação de paralelismo de barras, as zonas Z_1 e Z_2 são alteradas, pelo fato de não se ter medição de corrente no ramo formado pela série das chaves seccionadoras seletoras de Barra 1 e 2 do vão que está sendo manobrado. Conseqüentemente, a depender da distribuição do fluxo de potência no barramento, pode-se provocar uma atuação indevida das zonas de proteção. Para contornar essa situação, diferentes estratégias podem ser usadas. Por exemplo, é possível expandir ambas as zonas Z_1 e Z_2 para cobrir as duas barras, de modo que elas passam a ser iguais durante o paralelismo de barras.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração durante as manobras de transferência de vãos é o caso de atraso na mudança de estados ou de falha dos contatos lógicos das chaves seccionadoras seletoras de barra. Conseqüentemente, os *flags* de habilitação podem assumir um estado lógico errado, também provocando uma atuação indevida das zonas de proteção. Para evitar isso, tipicamente utiliza-se a supervisão do *trip* das zonas Z_1 e Z_2 . Essa supervisão pode ser feita de diferentes formas, sendo uma das mais comuns o uso de uma zona diferencial de supervisão ou checagem, do inglês *check-zone*, que engloba as duas barras simultaneamente, de modo a ser convenientemente denominada de zona Z_{12} (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009).

A *check-zone* não tem a função de enviar comando de abertura para os disjuntores, apenas de supervisão da atuação das zonas Z_1 e Z_2 . Além disso, ela não leva em consideração os estados das chaves seccionadoras seletoras de barra e nem inclui os TCs do vão de interligação de barras na sua malha diferencial, gerando, assim, uma grande zona que inclui todos os demais vãos como se estivessem conectados a uma mesma barra. Dessa forma, a lógica de identificação de qual zona de proteção cada vão pertence passa a verificar não somente o estado das chaves seccionadoras seletoras de barra, mas também da variável PB , como mostrado na Tabela 2.3., na qual \overline{PB} representa a negação do estado lógico da variável PB , obtida pelo operador booleano

NOT. Com isso, a lógica de *trip* dos disjuntores também é alterada, passando a levar em consideração a zona de supervisão Z_{12} , como mostra a Tabela 2.4.

Tabela 2.3. Estados lógicos dos *flags* de habilitação de corrente, considerando o paralelismo de barras.

Vão	TC	Flag	Expressão Lógica
L1	TCB1	f_1^1	$S1L1 \text{ OR } [PB \text{ AND } (DJL1 \text{ OR } SBL1)]$
		f_1^2	$S2L1 \text{ OR } [PB \text{ AND } (DJL1 \text{ OR } SBL1)]$
		f_1^{12}	$DJL1 \text{ OR } (SBL1 \text{ AND } DJAC)$
L2	TCB2	f_2^1	$S1L2 \text{ OR } [PB \text{ AND } (DJL2 \text{ OR } SBL2)]$
		f_2^2	$S2L2 \text{ OR } [PB \text{ AND } (DJL2 \text{ OR } SBL2)]$
		f_2^{12}	$DJL2 \text{ OR } (SBL2 \text{ AND } DJAC)$
DJIB	TCIB1	f_{IB}^1	0
		f_{IB}^2	$\overline{PB} \text{ AND } DJIB$
		f_{IB}^{12}	0
	TCIB2	f_{IB}^1	$\overline{PB} \text{ AND } DJIB$
		f_{IB}^2	0
		f_{IB}^{12}	0

Tabela 2.4. Lógica de *trip* dos disjuntores.

Disjuntor	Expressão Lógica
DJL1	$[(Z_1 \text{ AND } S1L1) \text{ OR } (Z_2 \text{ AND } S2L1)] \text{ AND } Z_{12}$
DJL2	$[(Z_1 \text{ AND } S1L2) \text{ OR } (Z_2 \text{ AND } S2L2)] \text{ AND } Z_{12}$
DJIB	$(Z_1 \text{ OR } Z_2) \text{ AND } Z_{12}$

2.4.2 Efeito do Acoplamento Mútuo de Sequência Zero em Linhas de Transmissão

Conforme mencionado anteriormente, no que diz respeito à proteção de barramentos, normalmente os TCs são instalados entre o elemento de conexão do vão ao barramento (que pode ser um disjuntor ou uma chave seccionadora, a depender do tipo de topologia empregada) e o próprio componente do sistema (linha de transmissão, transformador, etc.). Particularmente, uma atenção especial deve ser dada para linhas de transmissão que possuem acoplamento mútuo de sequência zero, decorrente do fato de constituírem linhas de circuitos duplos ou por compartilharem a mesma faixa de servidão durante toda ou parte de sua extensão. A problemática surge quando uma das linhas está fora de operação e com seus terminais aterrados via chaves seccionadoras de aterramento, conforme ilustrado na Figura 2.12. Mesmo com a linha fora de operação, devido à localização dos TCs, eles permanecerão dentro do laço de sequência zero do

sistema. Assim, quando ocorrer um curto-circuito que envolva a terra na linha que permanece em operação, devido ao acoplamento de sequência zero entre as linhas, uma corrente circulará pelos TCs da linha que está desenergizada, podendo levar a uma operação indevida da proteção do barramento, já que, a priori, esse vão não foi retirado da malha diferencial uma vez que a seccionadora seletora de barra continuaria fechada. Para contornar essa situação, as lógicas de atribuição dos estados dos *flags* de habilitação de corrente devem contemplar o estado dos disjuntores de interligação de cada vão ao barramento (ou seccionadoras, a depender da topologia empregada). Dessa forma, as expressões lógicas apresentadas na Tabela 2.3 são modificadas para aquelas apresentadas na Tabela 2.5.

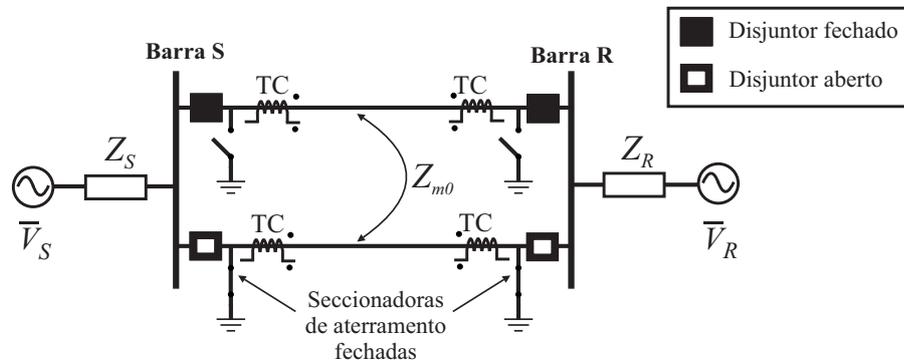


Figura 2.12. Efeito do acoplamento mútuo de sequência zero em linhas de transmissão.

Tabela 2.5. Estados lógicos dos *flags* de habilitação de corrente, considerando o paralelismo de barras e o efeito do acoplamento mútuo de sequência zero.

Vão	TC	Flag	Expressão Lógica
L1	TCB1	f_1^1	$[S1L1 \text{ AND } (DJL1 \text{ OR } SBL1)] \text{ OR } [PB \text{ AND } (DJL1 \text{ OR } SBL1)]$
		f_1^2	$[S2L1 \text{ AND } (DJL1 \text{ OR } SBL1)] \text{ OR } [PB \text{ AND } (DJL1 \text{ OR } SBL1)]$
		f_1^{12}	$DJL1 \text{ OR } (SBL1 \text{ AND } DJAC)$
L2	TCB2	f_2^1	$[S1L2 \text{ AND } (DJL2 \text{ OR } SBL2)] \text{ OR } [PB \text{ AND } (DJL2 \text{ OR } SBL2)]$
		f_2^2	$[S2L2 \text{ AND } (DJL2 \text{ OR } SBL2)] \text{ OR } [PB \text{ AND } (DJL2 \text{ OR } SBL2)]$
		f_2^{12}	$DJL2 \text{ OR } (SBL2 \text{ AND } DJAC)$
DJIB	TCIB1	f_{IB}^1	0
		f_{IB}^2	$\overline{PB} \text{ AND } DJIB$
		f_{IB}^{12}	0
	TCIB2	f_{IB}^1	$\overline{PB} \text{ AND } DJIB$
		f_{IB}^2	0
		f_{IB}^{12}	0

2.5 ESTADO DE CONTATOS DE CHAVES SECCIONADORAS

Para obter um sistema de proteção de barramentos robusto que opere em qualquer configuração de barramento, simples ou complexa, é necessário que a seleção de zonas de proteção seja feita de forma dinâmica com as variações da topologia (STEENKAMP *et al.*, 2007). Com base no discutido na seção anterior, a seleção da zona de proteção está baseada na avaliação dos estados dos contatos auxiliares das chaves seccionadoras ou disjuntores (GUZMÁN *et al.*, 2004; STEENKAMP *et al.*, 2007).

Uma chave seccionadora inclui dois contatos auxiliares, o contato 89A, que é normalmente aberto (NA), e o 89B, que é normalmente fechado (NF). Ambos os contatos enviam os estados para a proteção de barra por meio de sinais digitais, como é mostrado na Figura 2.13, na qual uma saída de vão simples é representada.

Geralmente, o estado do contato auxiliar 89B da chave seccionadora é usado para remover ou adicionar elementos na malha diferencial. Quando a seccionadora fecha completamente, o estado do contato auxiliar 89B é aberto, portanto, o relé adiciona o TC associado desse vão no cálculo diferencial. Por outro lado, quando o estado de 89B é fechado, a seccionadora encontra-se aberta, desconsiderando esse vão na conta de i_{op} ou i_{res} . Porém, só os estados dos contatos auxiliares não garantem a correta inclusão em uma zona de proteção, haja visto que o estado mecânico dos contatos não coincide com o estado elétrico dos mesmos (GUZMÁN *et al.*, 2005). Isso ocorre devido à formação do arco elétrico antes do fechamento dos contatos mecanicamente, em manobras de fechamento da seccionadora, e ao manutenção do arco elétrico mesmo com os contatos mecanicamente separados, no caso de manobras de abertura da seccionadora.

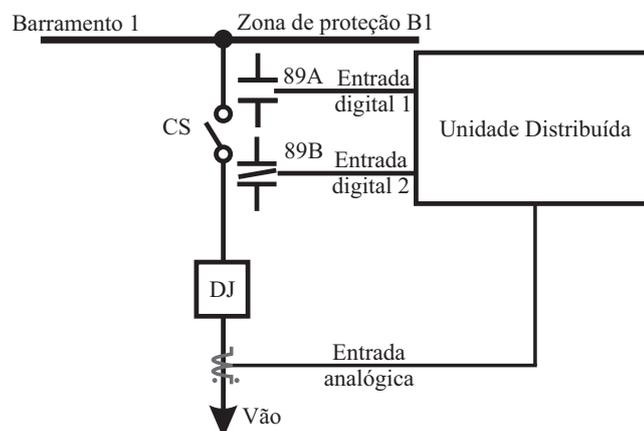


Figura 2.13. Representação dos contatos auxiliares das chaves seccionadoras de um vão de saída.

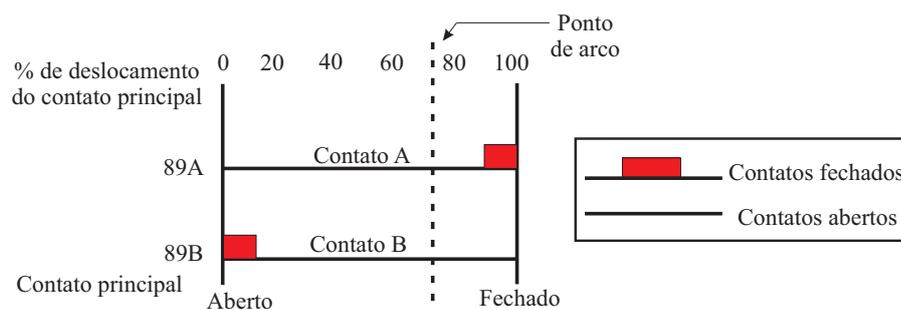


Figura 2.14. Representação de estados de contatos auxiliares de chaves seccionadoras.

Tabela 2.6. Estado de contatos auxiliares 89A e 89B

Caso	89A	89B	Posição da chave seccionadora
1	0	0	Fechada
2	0	1	Aberta
3	1	0	Fechada
4	1	1	Fechada

Para se ter maior garantia de seleção acertada de uma zona de proteção, a posição do contato principal da seccionadora também deve ser levado em consideração e recebido como informação de entrada no relé. Como é mostrado na Figura 2.14., o contato principal tem que percorrer desde o 0% até o 100%, onde 0% indica a posição na qual esse contato está totalmente aberto e 100% totalmente fechado. Existe uma região limite definida como ponto de arco, que é considerada como o ponto no qual a corrente primária começa ou deixa de circular pela seccionadora, dependendo se a manobra é de fechamento ou abertura.

Em uma manobra de fechamento, no momento que o contato principal passa pelo ponto de arco, o contato 89B adiciona o vão na malha diferencial. De forma análoga, se o contato principal passa pelo ponto de arco em uma manobra de abertura, o contato 89B retira o vão da malha diferencial.

Nas posições intermediárias, nas quais os contatos 89A e 89B não estão completamente abertos, emprega-se a lógica apresentada na Tabela 2.6.

2.5.1 Manobra de Fechamento da Chave Seccionadora

Durante uma operação de fechamento da seccionadora, como é ilustrado na Figura 2.15, quando o contato principal está começando seu percurso, o contato 89A está aberto enquanto

que o 89B ainda está fechado. Esta situação representa o caso 2 reportado na Tabela 2.6, de modo que esse elemento não será incluído na malha diferencial.

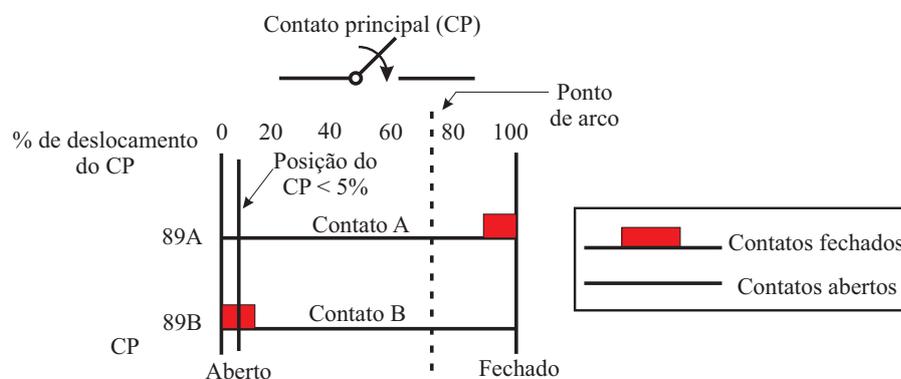


Figura 2.15. Representação de estados de contatos auxiliares chaves seccionadoras, totalmente aberta.

2.5.2 Chave Seccionadora em Posição Intermediária

Enquanto a seccionadora ainda está sendo fechada, representando o caso 1 da Tabela 2.6, o contato 89B abre, o principal está avançando para o ponto de arco. Portanto, o elemento será adicionado à malha diferencial, ver Figura 2.16.

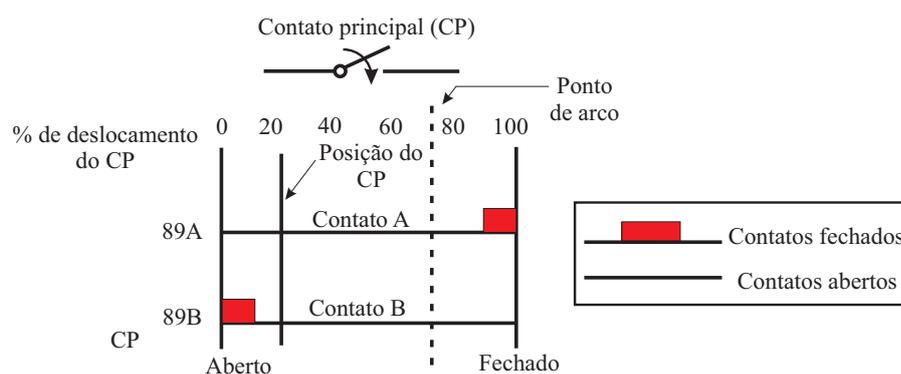


Figura 2.16. Representação de estados de contatos auxiliares chaves seccionadoras, posição intermediária.

2.5.3 Contato auxiliar 89A fechado

Quando a chave seccionadora está totalmente fechada, caso 3 da Tabela 2.6, o contato 89A está fechado e o 89B aberto, como é mostrado na Figura 2.17. O contato principal passou muito antes pelo ponto de arco e a seccionadora já tinha incluído o elemento na malha diferencial.

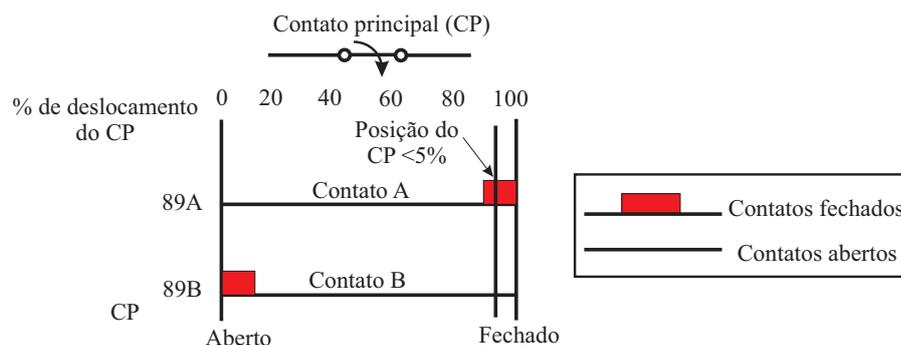


Figura 2.17. Representação de estados de contatos auxiliares chaves seccionadoras, totalmente fechada.

2.5.4 Manobra de Abertura da Chave Seccionadora

Neste caso, o contato principal inicia seu deslocamento desde a posição fechada, fazendo que 89A e 89B fiquem abertos por se localizarem em posições intermediárias. No instante em que o contato 89B seja fechado e o contato principal esteja perto do 0 % no seu deslocamento o elemento é retirado da malha diferencial.

2.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os fundamentos da proteção diferencial de baixa impedância de barramentos baseada nos valores instantâneos das correntes. Foram apresentadas as lógicas de *trip* 1-de-1 e 2-de-2, que garantem atuações rápidas para curtos-circuitos internos e segurança para curtos-circuitos externos, mesmo para aqueles com severa saturação de TCs. Também foram apresentadas as lógicas adaptativas de seleção de zonas, as quais levam em consideração os estados lógicos das chaves seccionadoras e disjuntores de cada vão conectado ao barramento, permitindo, assim, que a proteção diferencial de baixa impedância possa ser aplicada às mais complexas topologias de barramento. Ressalta-se que tais conceitos foram de extrema importância para o desenvolvimento do algoritmo de proteção diferencial de baixa impedância de barramentos proposto neste trabalho.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS DA TRANSFORMADA *WAVELET*

O conceito de *wavelet* é resultado de uma síntese de idéias originadas independentemente em diversas áreas, como matemática, geologia e engenharia. Embora seus princípios básicos sejam considerados como oriundos da transformada de Haar proposta em 1910, apenas na década de 80 é que eles foram matematicamente formulados, sendo considerado o trabalho de Grossman & Morlet (1984) como o marco decisivo na história das *wavelets*. Neste trabalho, os autores propuseram a transformada *wavelet* contínua. A partir de então, a comunidade matemática iniciou o refinamento da teoria das *wavelets*, destacando-se as contribuições de Daubechies (1992), que apresentou o conceito da transformada *wavelet* discreta (TWD), e Mallat (1989), que desenvolveu o conceito matemático para a análise multiresolucional, permitindo o cálculo da TWD através de um algoritmo recursivo denominado algoritmo piramidal.

Apesar da TWD ser calculada de forma extremamente rápida utilizando-se o algoritmo de Mallat (1989), ela torna-se variante no tempo devido à decimação empregada às amostras do sinal. Além disto, a decimação também provoca distorções na reconstrução do sinal. Estas características do algoritmo de Mallat (1989) podem inviabilizar o seu uso em algumas aplicações. Nestes casos, pode-se utilizar um outro algoritmo derivado do algoritmo de Mallat (1989), mas que não realiza o processo de decimação das amostras. Como resultado, a transformada passa a ser invariante no tempo. Desta forma, a TWD calculada por esse algoritmo passa a ser denominada TWD não-decimada, invariante no tempo ou redundante. Neste trabalho, utilizou-se o termo TWD redundante (TWDR) (PERCIVAL; WALDEN, 2000). Foi selecionada a TWDR devido a que oferece maior velocidade na detecção de transitórios, além de ser uma ótima ferramenta quando é aplicada de forma recursiva para aplicações em tempo real (COSTA, 2014).

As principais diferenças entre a TWD e a TWDR são (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

- A TWDR não realiza a decimação por dois das amostras como a TWD, de onde vem o

termo redundante.

- A TWDR é uma transformada não-ortogonal, já a TWD é ortonormal.
- Ao contrário da TWD, a TWDR é uma transformada invariante no tempo.
- A TWDR pode ser aplicada a qualquer número de amostras maior que o número de coeficientes dos filtros escala ou *wavelet* da *wavelet* mãe ($N > L$), enquanto que a TWD requer que este número seja múltiplo inteiro de dois até o último nível de resolução.

As características de redundância e invariância no tempo permitem que a reconstrução de um sinal utilizando-se a TWDR apresente menos distorções do que utilizando a TWD (SILVA, 2009).

Neste Capítulo, apresenta-se de forma concisa os fundamentos da TWDR, os quais deram subsídio ao desenvolvimento do presente trabalho.

3.1 FILTROS *WAVELET* E ESCALA DA TWDR

Os coeficientes h_l dos filtros *wavelet* e g_l dos filtros escala da TWDR são obtidos a partir dos correspondentes filtros da TWD como (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$h_l = \frac{\tilde{h}_l}{\sqrt{2}} \quad \text{e} \quad g_l = \frac{\tilde{g}_l}{\sqrt{2}}, \quad (3.1)$$

nos quais \tilde{h}_l e \tilde{g}_l são, respectivamente, os coeficientes dos filtros *wavelet* e escala da TWD, de modo que os coeficientes h_l e g_l satisfazem as seguintes propriedades:

$$\begin{aligned} \sum_{l=0}^{L-1} h_l &= 0, \quad \sum_{l=0}^{L-1} h_l^2 = \frac{1}{2}, \quad \sum_{l=-\infty}^{+\infty} h_l h_{l+2n} = 0, \\ \sum_{l=0}^{L-1} g_l &= 1, \quad \sum_{l=0}^{L-1} g_l^2 = \frac{1}{2} \quad \text{e} \quad \sum_{l=-\infty}^{+\infty} g_l g_{l+2n} = 0. \end{aligned} \quad (3.2)$$

- O filtro *wavelet* deve somar zero (0) enquanto que o escala um (1).
- A energia é distribuída entre os filtros *wavelet* e escala.
- deve ser ortogonal inclusive aos deslocamento.

com $n \in \mathbb{N} - \{0\}$ e $l = 0, 1, 2, \dots, L-1$, onde L é número de coeficientes dos filtros *wavelet* e escala. Além disso, da mesma forma que na TWD, esses filtros também são filtros espelhados

em quadratura:

$$g_l = (-1)^{l+1} h_{L-1-l} \quad (3.3a)$$

$$h_l = (-1)^l g_{L-1-l}. \quad (3.3b)$$

Por exemplo, os coeficientes g_l da wavelet Daubechies 4 (db4) são:

$$g_0 = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad g_1 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad g_2 = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad \text{e} \quad g_3 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}},$$

de modo que, de acordo com a Equação 3.1, os coeficientes g_l são iguais a:

$$g_0 = \frac{1 + \sqrt{3}}{8}, \quad g_1 = \frac{3 + \sqrt{3}}{8}, \quad g_2 = \frac{3 - \sqrt{3}}{8} \quad \text{e} \quad g_3 = \frac{1 - \sqrt{3}}{8}$$

e os coeficientes h_l são obtidos pela Equação 3.3a como:

$$h_0 = g_3, \quad h_1 = -g_2, \quad h_2 = g_1 \quad \text{e} \quad h_3 = -g_0.$$

3.2 ALGORITMO PIRAMIDAL PARA CÁLCULO DA TWDR

De acordo com a análise multiresolucional (AMR), um sinal qualquer x pode ser decomposto em diferentes níveis de resolução, de modo a dividir o seu espectro em oitavas de frequências, conforme ilustrado na Figura 3.1. Isso porque os filtros espelhados em quadratura g_j (passa-baixas) e h_j (passa-altas) dividem ao meio o espectro de frequências do sinal x no nível de resolução j . Nesse sentido, os coeficientes escala $v_j(k)$ carregam as informações de mais baixa frequências do sinal no nível de resolução j , enquanto que os coeficientes *wavelet* $w_j(k)$ contém a informação das mais altas frequências do sinal neste mesmo nível de resolução. Este procedimento de cálculo dos coeficientes é também denominado algoritmo piramidal (PERCIVAL; WALDEN, 2000).

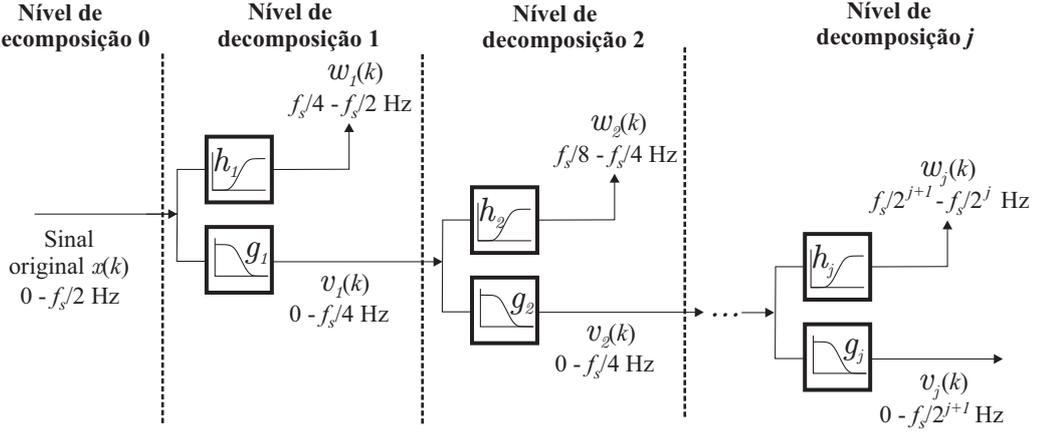


Figura 3.1. Análise Multiresolução AMR na TWDR.

3.2.1 Primeiro Nível de Resolução

Seja um sinal discreto \mathbf{X} constituído de N amostras. Os vetores de coeficientes *wavelet* \mathbf{W}_1 e de coeficientes escala \mathbf{V}_1 do primeiro nível de resolução do algoritmo piramidal da TWDR para o sinal \mathbf{X} podem ser calculados como:

$$\mathbf{W}_1 = \mathcal{B}_1 \mathbf{X} \quad (3.4a)$$

$$\mathbf{V}_1 = \mathcal{A}_1 \mathbf{X}, \quad (3.4b)$$

sendo \mathcal{B}_1 e \mathcal{A}_1 matrizes particularmente formadas por filtros *wavelet* e escala da *wavelet* mãe db4, são matrizes de ordem $N \times N$ e têm a seguinte forma:

$$\mathcal{B}_1 = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & h_2 & h_1 \\ h_1 & h_0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & h_2 \\ h_2 & h_1 & h_0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & h_3 & h_2 & h_1 & h_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & h_3 & h_2 & h_1 & h_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & h_3 & h_2 & h_1 & h_0 \end{bmatrix} \quad (3.5a)$$

$$\mathcal{A}_1 = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 \\ g_1 & g_0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_3 & g_2 \\ g_2 & g_1 & g_0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & g_3 & g_2 & g_1 & g_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & g_3 & g_2 & g_1 & g_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & g_3 & g_2 & g_1 & g_0 \end{bmatrix} \quad (3.5b)$$

De acordo com as Equações 3.4, os vetores de coeficientes *wavelet* \mathbf{W}_1 e de coeficientes escala \mathbf{V}_1 tem N elementos cada. Além disso, das Equações 3.5, as matrizes \mathcal{B}_1 e \mathcal{A}_1 são formadas a

partir de deslocamentos circulares das suas primeiras linhas. Em outras palavras, as linhas das matrizes \mathcal{B}_1 e \mathcal{A}_1 são interpretadas como sendo deslocamentos circulares dos coeficientes dos filtros *wavelet* e escala do primeiro nível de resolução da TWDR, respectivamente.

3.2.2 Segundo Nível de Resolução

No segundo nível de resolução do algoritmo piramidal da TWDR, o vetor de coeficientes escala \mathbf{V}_1 é tratado da mesma forma que \mathbf{X} no primeiro nível de resolução, de modo que:

$$\mathbf{W}_2 = \mathcal{B}_2 \mathbf{V}_1 = \mathcal{B}_2 \mathcal{A}_1 \mathbf{X} \quad (3.6a)$$

$$\mathbf{V}_2 = \mathcal{A}_2 \mathbf{V}_1 = \mathcal{A}_2 \mathcal{A}_1 \mathbf{X}, \quad (3.6b)$$

sendo \mathcal{B}_2 e \mathcal{A}_2 matrizes de ordem $N \times N$, da forma:

$$\mathcal{B}_2 = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & 0 & h_2 & 0 & h_1 & 0 \\ 0 & h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & 0 & h_2 & 0 & h_1 \\ h_1 & 0 & h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & 0 & h_2 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & h_3 & 0 & h_2 & 0 & h_1 & 0 & h_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & 0 & h_2 & 0 & h_1 & 0 & h_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & 0 & h_2 & 0 & h_1 & 0 & h_0 \end{bmatrix} \quad (3.7a)$$

$$\mathcal{A}_2 = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_3 & 0 & g_2 & 0 & g_1 & 0 \\ 0 & g_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_3 & 0 & g_2 & 0 & g_1 \\ g_1 & 0 & g_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_3 & 0 & g_2 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & g_3 & 0 & g_2 & 0 & g_1 & 0 & g_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_3 & 0 & g_2 & 0 & g_1 & 0 & g_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_3 & 0 & g_2 & 0 & g_1 & 0 & g_0 \end{bmatrix} \quad (3.7b)$$

Conforme as Equações 3.6, os vetores de coeficientes *wavelet* \mathbf{W}_2 e de coeficientes escala \mathbf{V}_2 têm N elementos cada. Além disso, a partir das Equações 3.7, as linhas das matrizes \mathcal{B}_2 e \mathcal{A}_2 são obtidas, respectivamente, a partir das linhas das matrizes \mathcal{B}_1 e \mathcal{A}_1 , colocando-se um zero entre dois coeficientes h_l e g_l consecutivos. Dessa forma, as linhas das matrizes \mathcal{B}_2 e \mathcal{A}_2 representam, respectivamente, os filtros *wavelet* e escala do segundo nível de resolução da TWDR, os quais possuem $2L - 1$ coeficientes.

3.2.3 j -ésimo Nível de Resolução

Analisando-se a formulação do primeiro e segundo níveis de resolução da TWDR, pode-se generalizar o cálculo do vetor de coeficientes *wavelet* \mathbf{W}_j e do vetor de coeficientes escala \mathbf{V}_j para o j -ésimo nível de resolução do algoritmo piramidal:

$$\mathbf{W}_j = \underbrace{\mathcal{B}_j \mathcal{A}_{j-1} \cdots \mathcal{A}_1}_{\mathcal{W}_j} \mathbf{X} = \mathcal{W}_j \mathbf{X} \quad (3.8a)$$

$$\mathbf{V}_j = \underbrace{\mathcal{A}_j \mathcal{A}_{j-1} \cdots \mathcal{A}_1}_{\mathcal{V}_j} \mathbf{X} = \mathcal{V}_j \mathbf{X}, \quad (3.8b)$$

sendo \mathcal{W}_j e \mathcal{V}_j matrizes de ordem $N \times N$. As matrizes \mathcal{B}_j e \mathcal{A}_j são obtidas a partir de deslocamentos circulares dos coeficientes dos filtros *wavelet* e escala do j -ésimo nível de resolução, que, por sua vez, são obtidos a partir dos filtros *wavelet* e escala do primeiro nível de resolução, colocando-se $2^{j-1} - 1$ zeros entre dois coeficientes h_l e g_l consecutivos. Por exemplo, as duas primeiras linhas da matriz \mathcal{B}_j são da forma:

$$\begin{array}{cccccccc} h_0 & \underbrace{0 \cdots 0}_{2^{j-1}-1} & h_1 & \underbrace{0 \cdots 0}_{2^{j-1}-1} & h_2 & \cdots & h_{L-2} & \underbrace{0 \cdots 0}_{2^{j-1}-1} & h_{L-1} & \underbrace{0 \cdots 0}_{N-L_j} \\ 0 & h_0 & \underbrace{0 \cdots 0}_{2^{j-1}-1} & h_1 & \underbrace{0 \cdots 0}_{2^{j-1}-1} & h_2 & \cdots & h_{L-2} & \underbrace{0 \cdots 0}_{2^{j-1}-1} & h_{L-1} & \underbrace{0 \cdots 0}_{N-L_j-1} \end{array} \quad (3.9)$$

e, de forma análoga, as duas primeiras linhas da matriz \mathcal{A}_j são escritas como:

$$\begin{array}{cccccccc} g_0 & \underbrace{0 \cdots 0}_{2^{j-1}-1} & g_1 & \underbrace{0 \cdots 0}_{2^{j-1}-1} & g_2 & \cdots & g_{L-2} & \underbrace{0 \cdots 0}_{2^{j-1}-1} & g_{L-1} & \underbrace{0 \cdots 0}_{N-L_j} \\ 0 & g_0 & \underbrace{0 \cdots 0}_{2^{j-1}-1} & g_1 & \underbrace{0 \cdots 0}_{2^{j-1}-1} & g_2 & \cdots & g_{L-2} & \underbrace{0 \cdots 0}_{2^{j-1}-1} & g_{L-1} & \underbrace{0 \cdots 0}_{N-L_j-1} \end{array} \quad (3.10)$$

em que $L_j = 2^{j-1}(L-1) + 1$ é o número de coeficientes dos filtros *wavelet* e escala no j -ésimo nível de resolução da TWDR.

A partir das Equações 3.8, os vetores de coeficientes *wavelet* \mathbf{W}_j e de coeficientes escala \mathbf{V}_j para todos os níveis de resolução tem N elementos cada.

3.2.4 Números de Níveis de Resolução da TWDR

De acordo com as Equações 3.9 e 3.10, o número máximo de níveis de resolução j_{max} da TWDR que pode ser calculado para um conjunto de N amostras é tal que $L_{j_{max}} \leq N$. Como

$L_j = 2^{j-1}(L-1) + 1$, sendo L o número de coeficientes dos filtros wavelet e escala da wavelet mãe escolhida, determinar-se j_{max} como:

$$j_{max} = \text{int} \left[\log_2 \left(\frac{N-1}{L-1} \right) + 1 \right], \quad (3.11)$$

no qual o operador $\text{int}[\cdot]$ tem como resultado a parte inteira de um número real.

Segundo Percival & Walden (2000), é possível decompor um sinal discreto até um nível de resolução j da TWDR, para o qual $L_j > N$. No entanto, isso provoca distorções no processo de filtragem, já que nesses casos é necessário descartar alguns coeficientes dos filtros durante a decomposição e síntese do sinal utilizando a TWDR.

3.2.5 Exemplo de Uso da TWDR

Para esclarecer o uso da TWDR e usado o exemplo reportado em (SILVA, 2009), considerando um sinal discreto \mathbf{X} , definido por oito valores:

$$\mathbf{X} = [4 \ 6 \ 10 \ 12 \ 8 \ 6 \ 5 \ 5]^T. \quad (3.12)$$

Considere a wavelet Haar, cujos filtros escala e *wavelet* possuem dois coeficientes:

$$g_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad g_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad h_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{e} \quad h_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (3.13)$$

de modo que os respectivos coeficientes da TWDR são (vide Equação 3.1):

$$g_0 = \frac{1}{2}, \quad g_1 = \frac{1}{2}, \quad h_0 = \frac{1}{2} \quad \text{e} \quad h_1 = -\frac{1}{2}. \quad (3.14)$$

Como $N = 8$, a partir da Equação 3.11, $j_{max} = 3$. Dessa forma, a partir das Equações 3.9 e 3.10, as matrizes \mathcal{A}_j e \mathcal{B}_j dos três níveis de resolução são iguais a:

$$\mathcal{A}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \mathcal{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{A}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \mathcal{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{A}_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \mathcal{B}_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

De acordo com as Equações 3.8, os vetores de coeficientes escala \mathbf{V}_j e wavelet \mathbf{W}_j dos três níveis de resolução são:

$$\mathbf{V}_1 = \mathcal{A}_1 \mathbf{X} \quad \text{e} \quad \mathbf{W}_1 = \mathcal{B}_1 \mathbf{X}, \quad (3.15a)$$

$$\mathbf{V}_2 = \mathcal{A}_2 \mathcal{A}_1 \mathbf{X} \quad \text{e} \quad \mathbf{W}_2 = \mathcal{B}_2 \mathcal{A}_1 \mathbf{X}, \quad (3.15b)$$

$$\mathbf{V}_3 = \mathcal{A}_3 \mathcal{A}_2 \mathcal{A}_1 \mathbf{X} \quad \text{e} \quad \mathbf{W}_3 = \mathcal{B}_3 \mathcal{A}_2 \mathcal{A}_1 \mathbf{X}. \quad (3.15c)$$

Dessa forma, obtêm-se:

$$\mathbf{V}_1 = \left[5 \quad 8 \quad 11 \quad 10 \quad 7 \quad \frac{11}{2} \quad 5 \quad \frac{9}{2} \right]^T \quad \text{e} \quad \mathbf{W}_1 = \left[-1 \quad -2 \quad -1 \quad 2 \quad 1 \quad \frac{1}{2} \quad 0 \quad \frac{1}{2} \right]^T,$$

$$\mathbf{V}_2 = \left[8 \quad 9 \quad 9 \quad \frac{31}{4} \quad 6 \quad 5 \quad 5 \quad \frac{25}{4} \right]^T \quad \text{e} \quad \mathbf{W}_2 = \left[-3 \quad -1 \quad 2 \quad \frac{9}{4} \quad 1 \quad \frac{1}{2} \quad 0 \quad \frac{7}{4} \right]^T,$$

$$\mathbf{V}_3 = [7 \quad 7 \quad 7 \quad 7 \quad 7 \quad 7 \quad 7 \quad 7]^T \quad \text{e} \quad \mathbf{W}_3 = \left[1 \quad 2 \quad 2 \quad \frac{3}{4} \quad -1 \quad -2 \quad -2 \quad -\frac{3}{4} \right]^T.$$

3.3 CÁLCULO DA TWDR RÁPIDA

Tomando-se por base a formulação matemática apresentada na Seção 3.2, verifica-se que a maioria dos elementos das matrizes \mathcal{B}_j e \mathcal{A}_j são iguais a zero, de modo que o cálculo dos coeficientes *wavelet* e escala usando essas matrizes vai envolver muitas multiplicações por zero.

Sendo assim, a fim de se realizar esse cálculo de forma mais eficiente computacionalmente, emprega-se a chamada TWDR rápida, que consiste em omitir as multiplicações por zero durante o cálculo dos coeficientes, resultando nas seguintes expressões para o j -ésimo nível de resolução (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$w_j(k) = \sum_{l=0}^{L_j-1} h_l v_{j-1}(k-l) , \quad (3.16)$$

$$v_j(k) = \sum_{l=0}^{L_j-1} g_l v_{j-1}(k-l) , \quad (3.17)$$

nas quais w_j e v_j são os coeficientes *wavelet* e escala do j -ésimo nível de resolução da TWDR e L_j é o número de coeficientes da *wavelet* mãe.

Conforme as Equações 3.16 e 3.17, os coeficientes w_j e v_j do nível de resolução j da TWDR seriam calculados aplicando-se, respectivamente, os filtros *wavelet* h e escala g aos coeficientes v_{j-1} do nível de resolução $j-1$, os quais são definidos a depender da *wavelet* mãe empregada. Em particular, no cálculo dos coeficientes do primeiro nível de resolução, utilizam-se os coeficientes v_0 , que correspondem às amostras do sinal original x (PERCIVAL; WALDEN, 2000).

3.4 ENERGIA DOS COEFICIENTES *WAVELET* E ESCALA

Segundo o teorema de Parseval, a energia de um sinal x é distribuída sobre todo o espectro de frequências, de modo que pode ser calculada como a somatória das potências quadráticas dos coeficientes escala do último nível de resolução j_{max} e de todos os coeficientes *wavelet* calculados nos demais níveis de resolução (PERCIVAL; WALDEN, 2000; COSTA, 2010):

$$\sum_{k=1}^N [x(k)]^2 = \sum_{k=1}^N [v_{j_{max}}(k)]^2 + \sum_{j=1}^{j_{max}-1} \sum_{k=1}^N [w_j(k)]^2 , \quad (3.18)$$

sendo:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N [x(k)]^2 & - \text{energia do sinal original;} \\ \sum_{k=1}^N [v_{j_{max}}(k)]^2 & - \text{energia dos coeficientes escala no nível de resolução } j_{max}; \\ \sum_{k=1}^N [w_j(k)]^2 & - \text{energia dos coeficientes } \textit{wavelet} \text{ no nível de resolução } j. \end{aligned}$$

3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada uma fundamentação teórica básica da TWDR, evidenciando-se a aplicação do algoritmo piramidal, a fim de se calcular os coeficientes *wavelet* e escala nos diferentes níveis de resolução. Em especial, chama-se atenção para o cálculo da TWDR rápida e do cálculo das energias dos coeficientes *wavelet* e escala, conceitos estes que foram determinantes no desenvolvimento do algoritmo de proteção diferencial de baixa impedância de barramentos proposto nesse trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se neste capítulo uma revisão bibliográfica sobre os principais tópicos relacionados com o tema de pesquisa abordado neste documento. Basicamente, duas temáticas gerais são revisadas: a proteção diferencial de barramentos tradicional e a proteção diferencial de barramentos usando a transformada *wavelet*. Estudos pioneiros sobre a proteção de sistemas elétricos de potência usando a transformada *wavelet* surgiram nos anos 90, o que comprova que essa técnica consiste em uma ferramenta matemática relativamente nova (JIANG *et al.*, 2001). Como consequência, a inserção da transformada *wavelet* em aplicações voltadas para a análise de sistemas de potência resultou no aumento do interesse dos pesquisadores em estudar formas de aproveitamento dos fenômenos transitórios em sistemas elétricos de potência em aplicações de proteção, especialmente por viabilizar a redução dos tempos de atuação (JIANG *et al.*, 2001; CASTRO; DÍAZ, 2002).

Nos sistemas elétricos modernos, a proteção diferencial tem sido aplicada em barramentos por meio dos relés microprocessados, os quais disponibilizam de uma infraestrutura interna que permite a implementação digital de algoritmos. Assim, utilizando esse tipo de dispositivo, os esquemas de proteção se tornam mais simples de implementar, além de promover uma economia de espaço (dispositivos compactos) e dinheiro na maioria dos casos. Além disso, os relés microprocessados permitem o agrupamento de diversas funções de proteção em um único dispositivo, facilitando as condições para detecção de situações de faltas nos sistemas monitorados Altuve & Schweitzer (2010).

4.1 PROTEÇÃO DIFERENCIAL TRADICIONAL DE BARRAMENTOS

Guzmán *et al.* (2005) apresentam as vantagens da implementação de esquemas de proteção diferencial de barramentos considerando zonas de proteção auto-adaptativas. Nestes casos, os

relés microprocessados ajustam suas lógicas às zonas de proteção de acordo com os vãos conectados aos barramentos. Além disso, os autores reportam que a combinação dos elementos instantâneos e filtrados resultam em uma proteção diferencial estável para faltas inclusive com elevado nível de saturação de TC, tempos rápidos de atuação para faltas internas e atrasos pequenos para faltas evolutivas. Aprofunda-se de forma clara a seleção das zonas de proteção por parte de relés instalados em subestações com configurações complexas e a definição do conceito de *check-zone* também são apresentados por Guzmán *et al.* (2005). O esquema diferencial proposto leva em consideração um esquema direcional que trabalha em paralelo com o esquema de detecção de faltas, o qual opera com os elementos instantâneos, sendo esta uma grande vantagem da implementação. Uma questão importante abordada está relacionada com a alta segurança oferecida pelo esquema diferencial ao não bloquear os elementos diferenciais durante falta que evoluem de externas para interna.

Basicamente, para se ter zonas de proteção adaptativas, os estados das chaves seccionadoras e disjuntores são considerados para a identificação dos vãos que de fato estão conectados ao barramento protegido, ou seja, dentro da zona de proteção. Por isso, com o objetivo de evitar a necessidade da monitoração constante dos contatos auxiliares das chaves seccionadoras, uma nova estratégia de ajuste automático das zonas de proteção em subestações com configuração flexível é proposta por Qin *et al.* (2000). A seleção se baseia na teoria dos grafos, permitindo a inclusão ou retirada de um elemento do cálculo da corrente diferencial durante faltas em barramentos ou em casos de falha no disjuntor sem a análise do estado de dispositivos seccionadores. A abordagem tem benefícios como de ser implementada em qualquer tipo de subestação, inclusive nas configurações flexíveis e de qualquer quantidade de barramentos. Os elementos diferenciais são implementados para tomar a decisão da operação da proteção, enquanto os elementos instantâneos são usados para detectar faltas internas e externas. Detalha-se ainda a estratégia de normalização dos sinais das correntes secundárias dos TCs (de ampères para pu) conforme reportado por Vianna (2013), o que viabiliza o uso de TCs com diferentes relações de transformação no barramento.

Ramar *et al.* (2012) propõem a aplicação de proteção de barramentos com elementos instantâneos. O diagnóstico do distúrbio é realizado com base em amostras das correntes tomadas um ciclo antes da incidência do curto-circuito, permitindo a comparação destas com os valores

atuais calculados pelo algoritmo. Em resumo, sendo a diferença entre as amostras maior que um dado valor pré-estabelecido por um certo número de amostras consecutivas, detecta-se uma falta. Além disso, é verificado o fator de estabilização, o qual equivale ao *slope* do plano operacional. Este fator de estabilização é definido como sendo a razão entre a corrente de operação e a corrente de restrição calculadas, de forma que, se este fator for maior que um determinado limiar, uma falta interna é declarada. Os resultados revelam que o envio de comando de *trip* ocorre em até 5 ms após a incidência de uma falta interna. Destaca-se a implementação de um esquema com elementos instantâneos a fim de melhorar os tempos de operação da proteção de barramentos, tentando fugir da grande maioria de soluções que calculam fasores. Trabalhos que usam elementos instantâneos são pouco abordados entre o tópico de proteção geral, o que acrescenta o mérito dessa implementação.

Além das abordagens supracitadas, a modelagem de esquemas de proteção de barramentos em programas do tipo EMTP tem despertado o interesse de pesquisadores e concessionárias, visto que permite a avaliação de situações de falta dificilmente encontradas em registros reais. Vianna (2013) apresenta a implementação na MODELS do ATP de um esquema de proteção diferencial de baixa impedância para barramentos. Os autores propõem um esquema de simulação em malha fechada, implementando as funções da proteção diferencial de baixa impedância em blocos funcionais desenvolvidos no *software*. O esquema funciona a partir da análise de elementos filtrados e tem operação baseada na característica do plano operacional com dual *slope* adaptativo aplicado em situações de saturação de TC. Ao longo do documento as funções de proteção e a implementação de dispositivos internos de um relé numérico microprocessado são desenvolvidas de forma detalhada. Além disso, Vianna (2013) apresenta uma avaliação da seleção adaptativa de zonas de proteção, a qual é considerada em sistemas de barramentos com configuração flexível, que serve de referência para este trabalho, devido a que também é implementado em um esquema de baixa impedância. Entretanto, no referido trabalho, não foram apresentadas análises referentes a condições de falta evolutiva, a qual será avaliada na presente dissertação. De outro lado, como ponto positivo, ressalta-se a grande quantidade de casos de simulação que mostram um comportamento estável do esquema de proteção modelado no ATP, além da boa operação das lógicas de designação de zonas quando o sistema em estudo é sometido a diversas manobras como transferências de cargas entre barras para manutenção de disjuntores.

Seguindo com o tópico de modelagem de esquemas de proteção em *softwares* do tipo EMTP, Alvarenga (2014) avaliou o desempenho de um algoritmo de proteção de barramentos de alta impedância, a qual é principalmente aplicada em barramento com configurações fixas. Essa proteção também foi implementada na linguagem MODELS do ATP. Basicamente, o relé realiza a comparação das tensões nos terminais do relé com um valor estabelecido de V_{pickup} . Assim, se a tensão nos terminais do relé for maior que o referido limiar, a proteção atua. Alvarenga (2014) avaliou condições de faltas mantendo o relé estável sem operações indevidas, como por exemplo, durante uma falta com elevada saturação de TC. Destaca-se este trabalho porque confirma que a modelagem de proteção em *softwares* do tipo EMTP pode ser aplicada em sistemas de alta impedância, além apresentar bom desempenho na análise no domínio do tempo.

Uma outra abordagem comum para esquemas de proteção de barramentos é baseada nos elementos direcionais, conforme reportado por Zou & Gao (2012). No referido trabalho, apresenta-se o estudo de uma proteção de barramentos com diversas unidades distribuídas, baseada na fundamentação de ondas viajantes, a qual opera com tempos de atuação muito baixos para faltas dentro da zona de proteção e com boa capacidade de distingui-las de faltas externas. O esquema de proteção de barramentos opera tomando como referência a direcionalidade das ondas viajantes de cada elemento conectado. Assim, define-se que para faltas internas à zona de proteção, todas as ondas viajantes medidas no barramento têm polaridade positiva. Caso contrário, se a falta acontecer em uma linha de transmissão, ou seja, se o distúrbio for externo ao barramento, a direcionalidade assumida pelas ondas viajantes será positiva para as linhas sãs e negativa para a linha com falta, permitindo a identificação de curtos externos. As unidades distribuídas instaladas em cada terminal usam os sinais de tensão e corrente locais para enviar comando de *trip*. Segundo Zou & Gao (2012), o esquema de proteção é simples e oferece bom desempenho na discriminação entre faltas internas e externas para diversos valores de R_{falta} e condições de saturação de TC, sendo este um complemento a esquemas de proteção diferencial.

4.2 PROTEÇÃO DE BARRAMENTOS BASEADA NA TEORIA *WAVELET*

Várias versões da transformada *wavelet* têm sido utilizadas para implementar esquemas de proteção ultra-rápidos aplicados a sistemas elétricos de potência. Na literatura relacionada a este tipo de abordagem, a maior parte das aplicações reportadas tem como foco a proteção de

transformadores e linhas de transmissão (CASTRO; DÍAZ, 2002). Por outro lado, trabalhos sobre o uso da transformada *wavelet* na proteção de barramentos ainda são escassos. No Brasil, as pesquisas que utilizam a transformada *wavelet* têm focado especialmente na proteção diferencial de transformadores, conforme reportado por Oliveira & Bretas (2009), Marques *et al.* (2013), Medeiros (2014), Medeiros *et al.* (2016). Nestes trabalhos, apresentam-se resultados que confirmam a viabilidade do uso das *wavelets* em esquemas de proteção, evidenciando a *wavelet* mãe da família Daubechies 4 (db4) como uma boa escolha para aplicações no âmbito da proteção de sistemas elétricos.

Em relação às funções de proteção de barramentos baseadas na transformada *wavelet* que se encontram disponíveis da literatura, faz-se oportuno destacar algumas características desses algoritmos. Eissa (2004) propôs uma implementação no domínio do tempo de uma proteção diferencial usando a transformada *wavelet* contínua (TWC). O objetivo foi desenvolver um algoritmo capaz de identificar de forma fácil e segura faltas dentro ou fora de uma dada zona de proteção. Para tanto, os coeficientes *wavelet* das correntes medidos nos vãos conectados ao barramento protegido são calculados e, em seguida, analisados para identificação do curto-circuito. O critério de envio de *trip* da proteção é associado à teoria comum de proteção diferencial, que realiza comparações de valores de operação e restrição. Para contornar erros durante a saturação dos TCs, identificou-se que a escolha do fator de escala da função *wavelet* derivada da *wavelet* mãe selecionada tem influência sobre a operação da proteção durante faltas externas. A avaliação do esquema proposto por Eissa (2004) ainda permite demonstrar que a proteção opera sem problemas para diversas condições de operação do sistema, inclusive em casos de saturação severa de TCs. Ressalta-se a implementação na busca de reduzir a influência da saturação de TC na proteção diferencial e que essa avaliação foi feita para vários graus de saturação da sua curva de magnetização. Além a avaliação dos sinais no domínio do tempo da uma ideia clara de redução dos tempos de operação.

Valsan & Swarup (2007) propõem um algoritmo direcional de proteção de barramentos segregado por fases. O esquema é analisado fazendo uso da TWD, a qual é apontada no trabalho como vantajosa em relação à transformada de Fourier (TF). Novamente, as componentes de alta frequência são usadas para a implementação da proteção de barramentos. Os autores indicam a relevância da escolha da *wavelet* mãe no que concerne à detecção de condições de falta. Para

isso, avaliações são realizadas e analisadas. No referido trabalho, conclui-se que o uso da db6 como *wavelet* mãe é suficiente para se ter uma análise confiável dos transitórios induzidos pela falta. Além disso, Valsan & Swarup (2007) comentam que o esquema apresentado não depende de técnicas de inteligência artificial ou conhecimentos avançados de engenharia, evidenciando a simplicidade da solução proposta. Em termos de simulações, os autores analisam faltas em um sistema de potência de barramento simples com elementos conectados, como linhas de transmissão e transformadores de potência. Dos resultados apresentados, a estabilidade da proteção foi garantida, resultando em tempos de atuação da ordem de 0,83 ms para condições de faltas internas considerando o caso mais rápido no qual deve atuar o esquema. Por fim, a proteção não é influenciada pelos fluxos de potência no barramento nem por mudanças nos valores das cargas elétricas conectadas aos barramentos ou às linhas de transmissão.

Uma proteção de barramentos fundamentada na transformada *wavelet* é desenvolvida por Wang *et al.* (2010). O esquema de proteção se baseia na AMR dos sinais, visto que analisa os coeficientes *wavelet* e escala do quarto nível de resolução obtidos usando a TWD. Uma vez que a TWD possui um processo intrínseco de subamostragem por 2 para cada nível de decomposição, tem-se que, enquanto a frequência de amostragem do sinal original corresponde a 200 kHz, o seu quarto nível de resolução possui uma taxa correspondente de 12,5 kHz, o que reduz o nível de detalhe dos sinais analisados no tempo. Nesse caso, a estratégia utiliza o valor máximo dos coeficientes *wavelet*, conhecido em inglês como *wavelet modulus maxima*, o qual permite identificar singularidades ou descontinuidades nos sinais avaliados. Desta maneira, comandos de atuação são gerados a partir desses valores máximos, tornando o algoritmo robusto à saturação de TCs, bem como a variações no tipo e nos ângulos de incidência das faltas a qual é avaliada com o .

Utilizando uma abordagem similar à apresentada por Wang *et al.* (2010), desenvolveu-se por Mohammed (2005) um esquema de proteção de barramentos baseado na transformada *wavelet packet* (TWP). Os autores alegam que essa transformada proporciona melhor desempenho da proteção e uma estimativa mais precisa dos sinais quando comparada à transformada *wavelet* discreta tradicional, promovendo, portanto, uma melhor decomposição dos sinais de correntes de falta avaliados. Essa versão da transformada *wavelet* tem como objetivo criar uma árvore com as decomposições do sinal, viabilizando a comparação dos valores instantâneos da energia

dos coeficientes *wavelet* com limiares pré-definidos. Para a atuação da proteção, o critério de detecção de faltas tem que ser satisfeito por pelo menos 3 amostras consecutivas, ou seja, os valores de energia dos coeficientes *wavelet* devem ultrapassar um dado limiar por um dado período de tempo ininterrupto. Tanto para faltas externas quanto para casos de saturação normal ou severa de TCs a proteção apresentada por Mohammed (2005) demonstrou ser segura. Entretanto, os autores avaliaram apenas situações de faltas internas à zona protegida, deixando vago o relato do desempenho da função para outras situações tipicamente reportadas como críticas para a proteção de barramentos. Ainda assim, os autores afirmam que uma das vantagens da referida implementação é que esta não requer muitos recursos computacionais dos equipamentos microprocessados a serem utilizados.

Perera *et al.* (2011) apresentam um estudo de um esquema de proteção diferencial de barramentos que utiliza a TWD para extrair a direcionalidade das ondas viajantes decorrentes de faltas em uma configuração de barramento simples. Para tanto, são desenvolvidas unidades direcionais que avaliam todos os vãos de saída da subestação. O desempenho do método também levou em consideração a influência da transformada *wavelet* e foram testadas diferentes *wavelets* mãe, a exemplo da db2 e db4. Constata-se no referido trabalho que o uso dessas *wavelets* mãe torna o algoritmo de proteção sensível a ruídos. Além disso, os autores demonstram que o esquema de proteção implementado tem melhor desempenho quando usadas *wavelets* mãe com maior número de coeficientes do que a db1 e db2, a exemplo da db4 e db8. Os resultados obtidos na avaliação dos casos simulados permitem concluir que a operação da proteção pode ocorrer em tempos menores que um quarto de ciclo e que a saturação de TCs não afeta o esquema apresentado, comprovando a robustez deste frente a qualquer tipo de falta.

De forma similar à maioria das referências citadas nesse capítulo, Eissa (2012) busca minimizar as dificuldades encontradas pela proteção de barramentos em casos de saturação de TCs. Para isso, implementa-se uma estratégia de proteção diferencial com a função *wavelet* chapéu mexicano. A proposta se baseia no fato de que, quando a análise de frequências nos sinais monitorados são realizadas no domínio tempo, as contribuições energéticas de baixa frequência são visíveis no espectro de tempo simulado. Por outro lado, as altas frequências podem ser visualizadas em varias bandas de frequências, nas quais pode-se identificar os instantes de saturação de TCs. As correntes de operação de cada fase são calculadas com janelas que

deslizam no tempo sobre os sinais monitorados e, assim, quando essas correntes ultrapassam um dado limiar positivo, assume-se que o critério de *trip* foi satisfeito, emitindo o comando de abertura dos disjuntores associados. Deve-se destacar ainda que o esquema apresentado por Eissa (2012) é sensível para faltas internas à zona protegida, sendo estável e seguro para faltas externas, mesmo em casos de elevada saturação de TC.

Em relação aos avanços recentes de esquemas de proteção diferencial de barramentos baseados na teoria *wavelet*, têm sido propostas abordagens similares às anteriormente descritas, mudando apenas a função *wavelet* utilizada no cálculo das grandezas a serem analisadas para a tomada de decisão de *trip* (EISSA, 2013; EISSA, 2014). Nesse trabalhos, o limiar de atuação da proteção foi definido pelo fator de sensibilidade que é determinado pela razão entre a corrente de operação e a corrente de restrição. Os resultados revelam que a proteção atuou adequadamente para todos os casos simulados.

4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Diante do exposto, de uma forma geral, os trabalhos referenciados neste capítulo apresentam esquemas de proteção baseados na transformada *wavelet* que possuem bom desempenho em casos de saturação de TC, mas pouco avaliam situações adversas de falta evolutiva com ou sem saturação de TC. Destacou-se na Tabela 4.1 os trabalhos avaliados relacionando os tópicos abordados em cada uma das referências. Adicionalmente, um ponto positivo a ressaltar e que é normalmente destacado pelos autores, é que as implementações não requerem de um grande esforço computacional, evidenciando a busca por soluções com boas relações entre custo computacional, simplicidade e robustez. Além que de forma geral as pesquisas são orientadas implementar esquemas segredados por fase, a modo de detectar faltas com qualquer fase. Ainda em relação à revisão bibliográfica realizada, um tema pouco abordado nos trabalhos referenciados que se baseiam na transformada *wavelet* foi a seleção adaptativa de zonas. Em boa parte desses trabalhos, as configurações de barramento analisadas são bastante simples e não incluem a análise dos estados das chaves seccionadoras e disjuntores. Destaca-se que um ponto negativo nas referências de proteção de barramentos usando *wavelet*, é que nenhuma referência usa cálculo de energia, nem implementa ambos os coeficientes de forma paralela como apresentado neste trabalho.

Tabela 4.1. Resumo dos trabalhos referentes ao trabalho de pesquisa.

Referência	Principais aspectos analisados									
	87B	87W	EI	EFI	SAT	MATP	FI	FE	SAZ	FEV
Qin <i>et al.</i> (2000)	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	-
Eissa (2004)	-	✓	✓	-	✓	-	✓	✓	-	-
Guzmán <i>et al.</i> (2005)	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓
Mohammed (2005)	-	✓	✓	-	✓	-	✓	✓	-	-
Valsan & Swarup (2007)	-	✓	✓	-	✓	-	✓	✓	-	-
Wang <i>et al.</i> (2010)	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-	-
Perera <i>et al.</i> (2011)	-	✓	✓	✓	-	-	-	✓	-	-
Eissa (2012)	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	-	-
Zou & Gao (2012)	✓	-	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-
Ramar <i>et al.</i> (2012)	✓	-	✓	-	✓	-	✓	✓	-	-
Vianna (2013)	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Eissa (2013)	-	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-
Eissa (2014)	-	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-
Alvarenga (2014)	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-

Legenda:

87B: Proteção diferencial de barramentos baseada em correntes;

87W: Proteção diferencial de barramentos usando transformada *wavelet*;

EI: Proteção de barramentos baseada na análise dos elementos instantâneos;

EFI: Proteção de barramentos baseada na análise dos elementos filtrados;

RF: Resistência de falta;

SAT: Saturação de TC;

DA: Desalinhamento de amostras; FI: Faltas internas;

FE: Faltas Externas;

FEV: Faltas evolutivas;

SAZ: Seleção adaptativa de zonas de proteção;

MATP: Modelagem em ATP;

ALGORITMO PROPOSTO

Apresenta-se neste capítulo a descrição do algoritmo de proteção diferencial de barramentos proposto neste trabalho, o qual é resultado da adequada representação no domínio *wavelet* dos conceitos fundamentais da proteção diferencial de baixa impedância abordados no Capítulo 2, que é poucas vezes abordada desde o ponto de vista da análise usando as energias dos coeficientes *wavelet* e escala como um conjunto, operando de forma paralela, como mostrado na Figura 5.1, onde é apresentado de forma resumida a metodologia aprofundada no decurso deste capítulo. Como resultado, o algoritmo proposto é capaz de promover *trips* extremamente rápidos e confiáveis para curtos-circuitos internos, com tempos da ordem microssegundos, e segurança para curtos-circuitos externos, mesmo aqueles com severa saturação de TCs. Além disso, com o emprego de lógicas de seleção de zonas, o algoritmo proposto pode ser facilmente aplicado às mais diversas configurações de barramento, inclusive aquelas que possuem uma topologia completamente variável, o que lhe confere viabilidade prática de utilização em aplicações reais de proteção de barramentos de SEs.

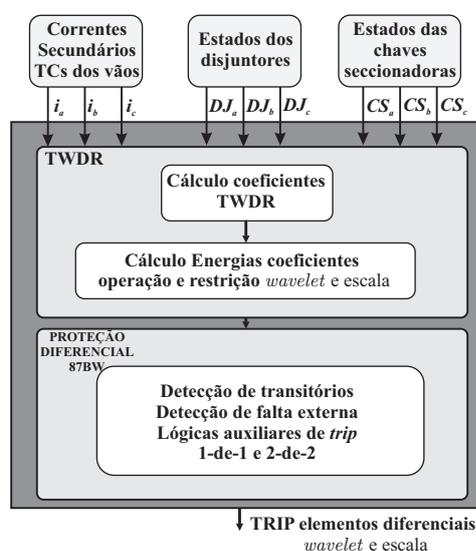


Figura 5.1. Diagrama de blocos geral do algoritmo proposto 87BW.

5.1 DESCRIÇÃO RESUMIDA DO ALGORITMO PROPOSTO

Para se fazer uma descrição resumida do algoritmo proposto, toma-se por base o diagrama de blocos apresentado na Figura 5.2, o qual representa apenas o funcionamento do elemento diferencial proposto que se baseia nos coeficientes *wavelet* (elemento diferencial *wavelet*). Além dele, também propõe-se um elemento diferencial que se baseia nos coeficientes escala (elemento diferencial escala), cujo diagrama é similar ao apresentado na Figura 5.2, de modo que, por simplicidade, não é apresentado nesse capítulo. Dessa forma, apresenta-se a seguir a descrição apenas do elemento diferencial *wavelet*.

De acordo com a Figura 5.2, as variáveis de entrada do algoritmo proposto são as correntes em cada fase, medidas nos secundários dos TCs dos P vãos conectados ao barramento ($i_{1\phi u}, i_{2\phi u}, \dots, i_{P\phi u}$), bem como os estados das chaves seccionadoras ($CS_{1\phi}, CS_{2\phi}, \dots, CS_{P\phi}$) e disjuntores ($DJ_{1\phi}, DJ_{2\phi}, \dots, DJ_{P\phi}$) a eles associados. As correntes são inicialmente normalizadas, para só depois servirem de entrada para o bloco TWDR, que é responsável pelo cálculo dos coeficientes *wavelet* ($w_{1\phi}, w_{2\phi}, \dots, w_{P\phi}$) do primeiro nível de resolução das correntes na fase ϕ de cada um dos P vãos conectados no barramento. O primeiro nível de resolução é usado

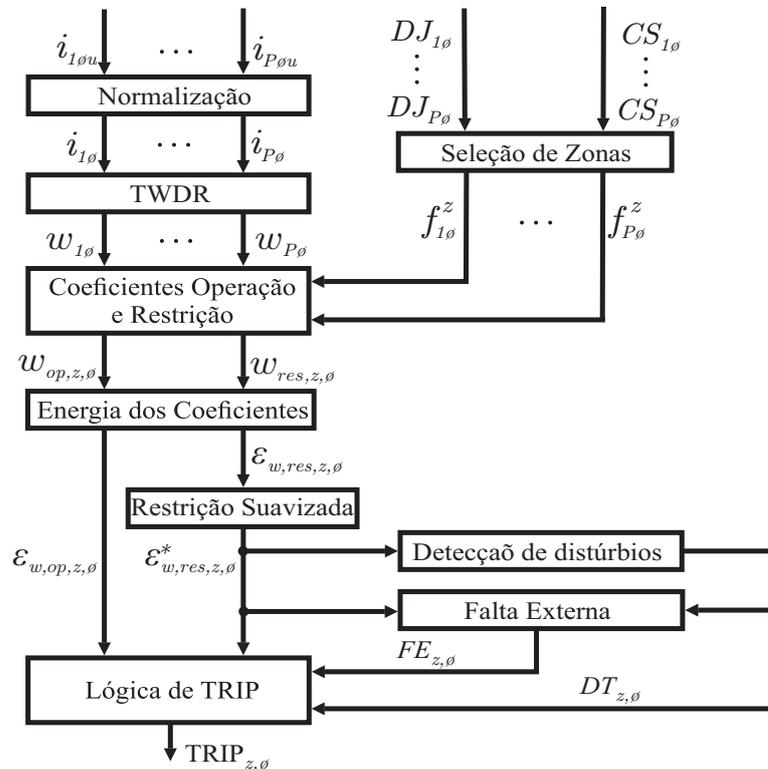


Figura 5.2. Diagrama de blocos do elemento diferencial *wavelet* proposto.

porque nele estão contidas as maiores frequências e, considerando implementar uma proteção rápida, os coeficientes *wavelet* do primeiro nível são os mais indicados para uma melhor representação dos transitórios. Por outro lado, os estados lógicos das seccionadoras e disjuntores são utilizados na lógica de seleção de fases, que depende da configuração de barramento que está sendo protegido, resultando nos *flags* de habilitação $(f_{1\phi}^z, f_{2\phi}^z, \dots, f_{P\phi}^z)$ de cada um dos P vãos nas diferentes zonas de proteção. Dessa forma, procede-se com o cálculo dos coeficientes de operação $w_{op,z,\phi}$ e de restrição $w_{res,z,\phi}$ para cada zona de proteção e para cada fase ϕ , aplicando-se os *flags* de habilitação aos correspondentes coeficientes *wavelet*. Em seguida, calculam-se as energias dos coeficientes de operação $\mathcal{E}_{w,op,z,\phi}$ e de restrição $\mathcal{E}_{w,res,z,\phi}$ para cada zona de proteção e para cada fase ϕ , conforme discutido na Seção 3.4. Aqui também procede-se com a suavização de $\mathcal{E}_{w,res,z,\phi}$, como discutido na Seção 2.1.1, obtendo-se a energia de restrição suavizada $\mathcal{E}_{w,res,z,\phi}^*$. Na sequência, analisando $\mathcal{E}_{w,op,z,\phi}$ e $\mathcal{E}_{w,res,z,\phi}^*$, executam-se lógicas de detecção de transitórios e de identificação de faltas externas. As saídas desses blocos são combinadas com as lógicas 1-de-1 e 2-de-2, devidamente adaptadas ao domínio *wavelet*, para avaliar o envio de *trip* pelo algoritmo proposto para cada uma das zonas de proteção de forma segregada por fase.

A seguir, apresenta-se uma descrição detalhada de cada um dos blocos que compõem o diagrama ilustrado na Figura 5.2, evidenciando-se, sempre que necessário, as particularidades do elemento diferencial escala proposto.

5.2 NORMALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DAS CORRENTES

Geralmente os TCs empregados na proteção diferencial de baixa impedância de barramentos têm relações de transformação diferentes (GUZMÁN *et al.*, 2004; GUZMÁN *et al.*, 2005). Dessa forma, para realizar a correta análise diferencial, faz-se necessário proceder com a normalização de todas as correntes, colocando-as na mesma base de referência. Para tanto, emprega-se um fator de normalização denominado *TAP*, que pode ser calculado para o p -ésimo vão da seguinte forma (ALTUVE; SCHWEITZER, 2010):

$$TAP_p = \frac{i_{2TCmax} \cdot RTC_{TCmax}}{RTC_p}, \quad (5.1)$$

na qual $i_{2TC_{max}}$ e $RTC_{TC_{max}}$ são, respectivamente, a corrente secundária nominal (1 ou 5 A) e a relação de transformação do TC com a maior relação dentre aqueles conectados ao barramento; e RTC_p é a relação de transformação do TC do p -ésimo vão.

Analisando a Equação (5.1), ao dividir a corrente no secundário do TC do p -ésimo vão pelo TAP_p , a mesma passa a ser referenciada ao primário desse TC, mas é normalizada para pu da corrente primária nominal do TC com a máxima relação de transformação. Dessa forma, as correntes medidas nos secundários dos TCs ($i_{1\phi_u}$, $i_{2\phi_u}$, ... , $i_{P\phi_u}$) são normalizadas para pu ($i_{1\phi}$, $i_{2\phi}$, ... , $i_{P\phi}$) no bloco de Normalização da Figura 5.2, antes de se proceder o cálculo dos coeficientes *wavelet* e escala do primeiro nível de resolução da TWDR.

5.3 CÁLCULO DA TWDR

O bloco TWDR é responsável pelo cálculo dos coeficientes *wavelet* $w_{p,\phi}$ e escala $v_{p,\phi}$ do primeiro nível de resolução da TWDR para cada fase ϕ do p -ésimo vão. Para tanto, particularizam-se as Equações (3.16) e (3.17) da TWDR rápida para o primeiro nível de resolução como (COSTA; DRIESEN, 2013; COSTA *et al.*, 2010):

$$w_{p,\phi}(k) = \sum_{l=1}^L h_l i_{p\phi}(k - L + l) , \quad (5.2)$$

$$v_{p,\phi}(k) = \sum_{l=1}^L g_l i_{p\phi}(k - L + l) , \quad (5.3)$$

nas quais k representa o k -ésimo instante de amostragem e $i_{p\phi}$ a corrente na fase ϕ do p -ésimo vão. Com as equações (5.2) e (5.3) é realizado um cálculo recursivo dos coeficientes levando em consideração amostras recentes ou anteriores do sinal original, tornando o algoritmo capaz de detectar transitórios de forma rápida e confiável em tempo real, podendo usar a metodologia em relés digitais comerciais.

Na Figura 5.3 são mostradas as formas de onda derivadas do cálculo dos coeficientes escala e *wavelet* no primeiro nível de resolução, associadas a uma corrente de falta de um sistema de potência. Os coeficientes *wavelet* apresentam uma forte presença de componentes de alta frequência, essas oscilações são aproveitadas para detecção de transitórios de faltas. De outro lado, os coeficientes escala mantem um comportamento similar ao sinal original, predominando

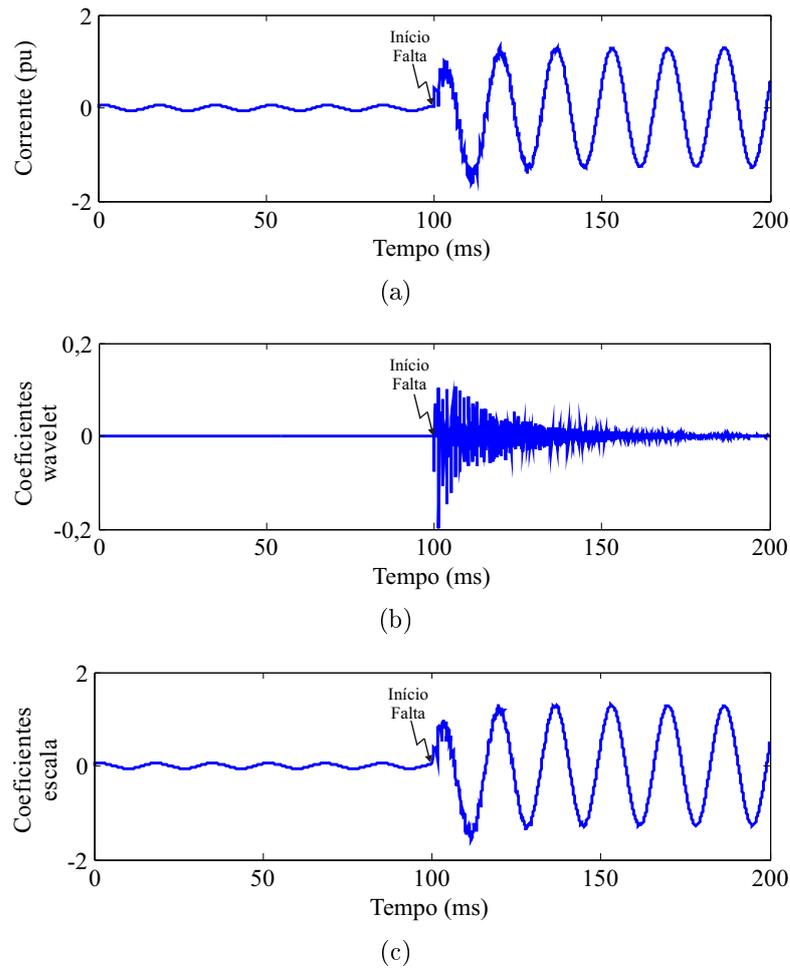


Figura 5.3. Cálculo dos coeficientes em tempo real: (a) sinal de corrente original; (b) coeficientes *wavelet*; (c) coeficientes escala.

as baixas frequências, principalmente de 60 Hz que ajudam a caracterizar e classificar alguns distúrbios não relacionados com fenômenos transitórios (COSTA, 2010).

5.4 SELEÇÃO DE ZONAS

O bloco *Seleção de Zonas* recebe como entradas os estados lógicos das chaves seccionadoras ($CS_{1\phi}, CS_{2\phi}, \dots, CS_{P\phi}$) e dos disjuntores ($DJ_{1\phi}, DJ_{2\phi}, \dots, DJ_{P\phi}$), segregados por fase, associados a cada um dos P vãos conectados ao barramento. Só então procede-se com as lógicas de seleção adaptativa de zonas, que são construídas conforme apresentado na Seção 2.4, a depender da configuração do barramento. Como saída, obtêm-se os *flags* de habilitação ($f_{1\phi}^z, f_{2\phi}^z, \dots, f_{P\phi}^z$) dos P vãos nas diferentes zonas de proteção e de forma segregada por fase.

5.5 CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE OPERAÇÃO E RESTRIÇÃO

De forma análoga ao apresentado na Seção 2.3, o bloco **Coeficientes Operação e Restrição** calcula os coeficientes *wavelet* de operação $w_{op,z,\phi}$ e de restrição $w_{res,z,\phi}$, assim como os coeficientes escala de operação $v_{op,z,\phi}$ e de restrição $v_{res,z,\phi}$, para cada zona de proteção z e para cada fase ϕ , aplicando-se os *flags* de habilitação ($f_{1\phi}^z, f_{2\phi}^z, \dots, f_{P\phi}^z$) aos correspondentes coeficientes *wavelet* e escala:

$$w_{op,z,\phi}(k) = \left| \sum_{p=1}^P f_{p\phi}^z \cdot w_{p\phi}(k) \right| \quad e \quad w_{res,z,\phi}(k) = \sum_{p=1}^P f_{p\phi}^z \cdot |w_{p\phi}(k)|, \quad (5.4)$$

$$v_{op,z,\phi}(k) = \left| \sum_{p=1}^P f_{p\phi}^z \cdot v_{p\phi}(k) \right| \quad e \quad v_{res,z,\phi}(k) = \sum_{p=1}^P f_{p\phi}^z \cdot |v_{p\phi}(k)|. \quad (5.5)$$

Nas Figuras 5.4 e 5.5 são mostradas as formas de onda do cálculo dos coeficientes *wavelet* e escala de operação e restrição, usando as Equações 5.4 e 5.5.

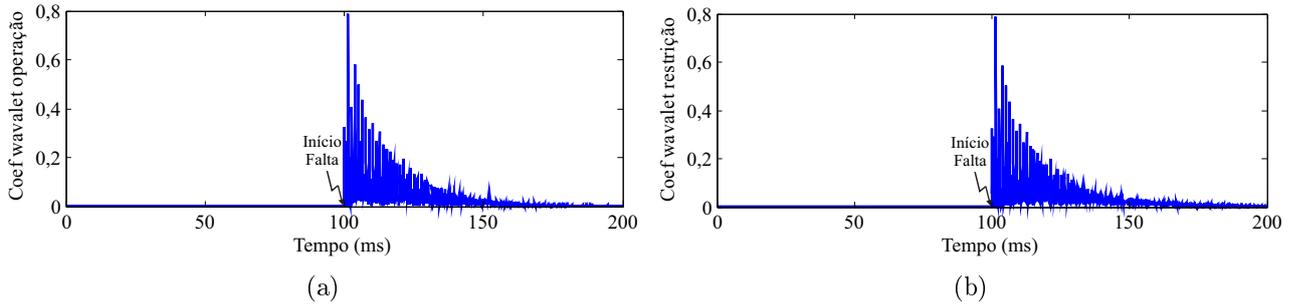


Figura 5.4. Cálculo diferencial dos coeficientes *wavelet*: (a) operação; (b) restrição.

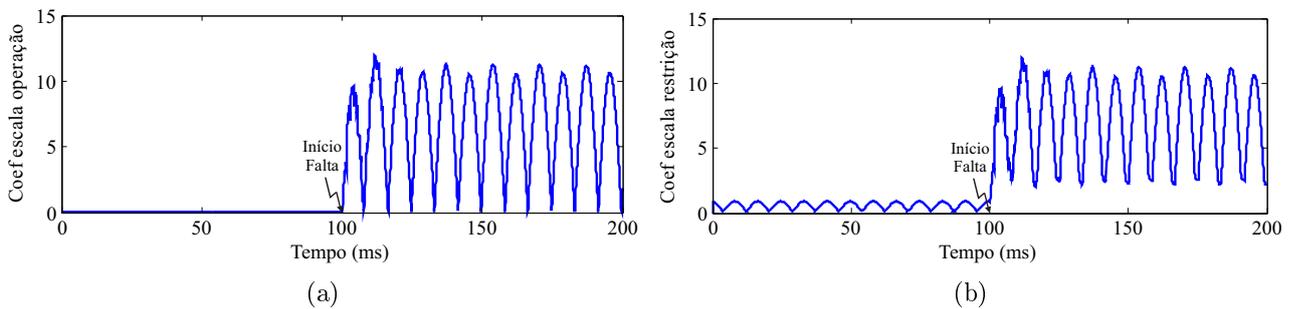


Figura 5.5. Cálculo diferencial dos coeficientes escala: (a) operação; (b) restrição.

5.6 CÁLCULO DA ENERGIA DOS COEFICIENTES DE OPERAÇÃO E RESTRIÇÃO

No bloco **Energia dos Coeficientes** são calculadas as energias dos coeficientes *wavelet* de operação $\mathcal{E}_{w,op,z,\phi}$ e de restrição $\mathcal{E}_{w,res,z,\phi}$, assim como as energias dos coeficientes escala

de operação $\mathcal{E}_{v,op,z,\phi}$ e de restrição $\mathcal{E}_{v,res,z,\phi}$ para cada zona de proteção z e para cada fase ϕ (COSTA; DRIESEN, 2013):

$$\mathcal{E}_{w,op,z,\phi}(k) = \sum_{q=k-Q+1}^k w_{op,z,\phi}^2(q) \quad \text{e} \quad \mathcal{E}_{w,res,z,\phi}(k) = \sum_{q=k-Q+1}^k w_{res,z,\phi}^2(q), \quad (5.6)$$

$$\mathcal{E}_{v,op,z,\phi}(k) = \sum_{q=k-Q+1}^k v_{op,z,\phi}^2(q) \quad \text{e} \quad \mathcal{E}_{v,res,z,\phi}(k) = \sum_{q=k-Q+1}^k v_{res,z,\phi}^2(q), \quad (5.7)$$

nas quais Q representa o tamanho da janela de coeficientes usados no cálculo das energias. Nesse trabalho adota-se $Q = 2L$, obtendo um resultado como o ilustrado na Figura 5.8.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 são apresentadas as energias dos coeficientes calculados no bloco anterior. As energias dos coeficientes *wavelet* mantêm oscilações fortes após a ocorrência da falta. De outro lado, as energias dos coeficientes escala tem variações suaves.

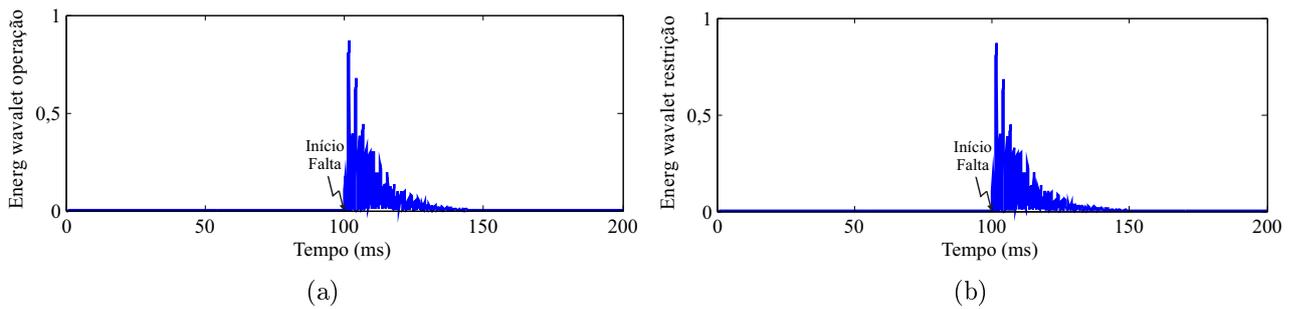


Figura 5.6. Cálculo das energias dos coeficientes *wavelet*: (a) operação; (b) restrição.

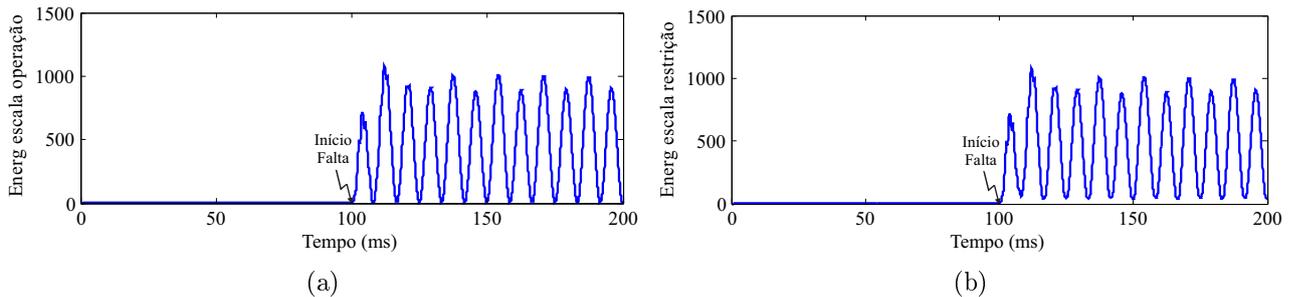


Figura 5.7. Cálculo das energias dos coeficientes escala: (a) operação; (b) restrição.

O tamanho da janela de cálculo da energia é tomado como $2L$ para garantir a identificação dos valores em que a energia de operação é maior que a restrição satisfazendo as condições para envio de *trip* com as lógicas auxiliares. Como apresentado na Figura 5.8, janelas de tamanho L poderiam não garantir as condições para envio de *trip* por parte do relé, principalmente durante transitórios muito severos com oscilações abruptas, tradicionalmente encontradas nos coeficientes *wavelet*. Escolhas de janelas maiores que $2L$ incrementam a largura dos pulsos,

deixando-os muito próximos, situação indesejada na avaliação de curtos evolutivos, quando a proteção deve atuar por meio da lógica 2-de-2.

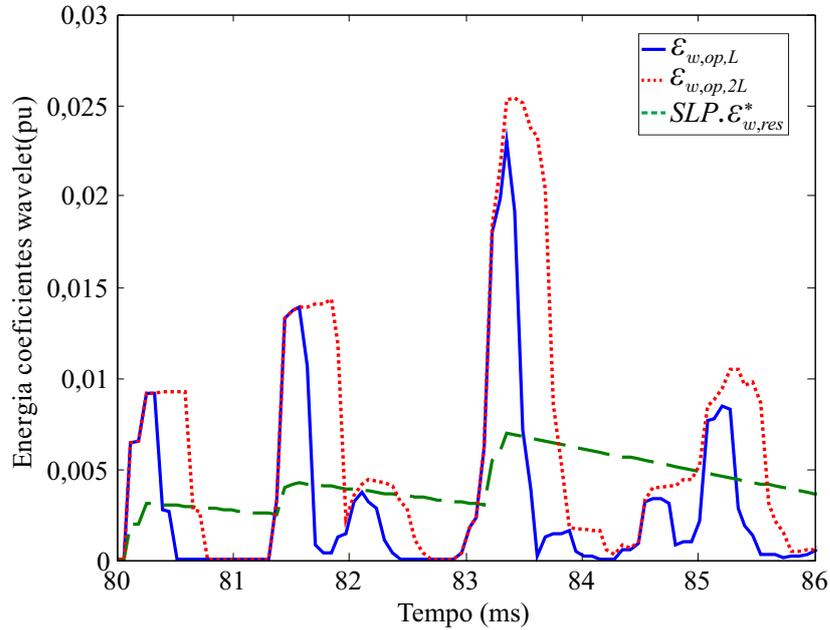


Figura 5.8. Escolha da janela para o cálculo da energia dos coeficientes.

5.7 ENERGIA DE RESTRIÇÃO SUAVIZADA

O bloco Restrição Suavizada realiza o cálculo da energia de restrição *wavelet* suavizada $\mathcal{E}_{w,res,z,\phi}^*$ e da energia de restrição escala suavizada $\mathcal{E}_{v,res,z,\phi}^*$, de forma análoga ao descrito na Seção 2.1.1. Esse procedimento é desenvolvido para garantir estabilidade do algoritmo proposto, inclusive nos casos de faltas externas com saturação severa dos TCs.

Conforme discutido na Seção 2.1.1, o decaimento das energias suavizadas $\mathcal{E}_{w,res,z,\phi}^*$ e $\mathcal{E}_{v,res,z,\phi}^*$ emula o processo de descarga de um capacitor, que sabidamente possui natureza exponencial, conforme ilustrado na Figura 5.9. Todavia, esse comportamento pode ser convenientemente aproximado por uma equação linear. Assim, com base na análise da Figura 5.9 e considerando o decaimento obtido no valor das energias após uma constante de tempo τ ¹, a equação da reta que aproxima o decaimento das energias de restrição suavizadas pode ser escrita como:

$$\mathcal{E}^* = M \left(-\frac{0,63}{\tau}t + 1 \right) . \quad (5.8)$$

¹Transcorrido um intervalo de tempo igual à constante de tempo τ , o valor do sinal deve ser reduzido a 63% do seu valor original, ou seja, experimentar uma redução de 37%.

De outro lado, os instantes

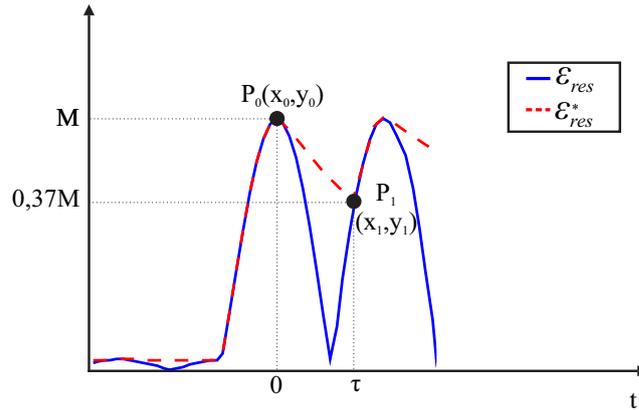


Figura 5.9. Construção da energia de restrição suavizada.

Nesse trabalho, considerou-se a constante de tempo de decaimento de $\mathcal{E}_{w,res,z,\phi}^*$ igual a 2 ms (1/8 ciclo do 60 Hz), devido às fortes variações dos transitórios nos coeficientes *wavelet*, enquanto que a constante de tempo de decaimento de $\mathcal{E}_{v,res,z,\phi}^*$ foi considerada igual a 64 ms (4 ciclos do 60 Hz), valor usado em relés comerciais que trabalham com elementos diferenciais instantâneos suavizando a energia de restrição, como reportado em SIEMENS (2006). Os coeficientes escala poderiam ter atuações análogas à proteção diferencial de barramentos 87B, por isso, este parâmetro pode ser definido como o usado em relés comerciais .

5.8 DETECÇÃO DE DISTÚRBIOS

O bloco *Detecção de Distúrbios* implementa uma modificação do algoritmo de detecção de transitórios proposto por Lopes *et al.* (2013). Originalmente esse algoritmo foi empregado com as energias dos coeficientes da Transformada de Park como sinais de entrada, enquanto que aqui têm-se como entradas as energias de restrição suavizadas $\mathcal{E}_{w,res,z,\phi}^*$ e $\mathcal{E}_{v,res,z,\phi}^*$, uma vez que os valores das energias de restrição sofrem variação tanto para faltas externas quanto para faltas internas (KUMAR; HANSEN, 1993).

Como ilustrado na Figura 5.10, a energia suavizada é percorrida por duas janelas, uma longa com tamanho Δ_{LONG} e a outra curta com tamanho Δ_{CURT} . A ideia é detectar os instantes nos quais acontecem variações abruptas dos sinais de energia, as quais caracterizam a ocorrência de transitórios no sistema. Para tanto, avalia-se o comportamento de um limiar auto-adaptativo

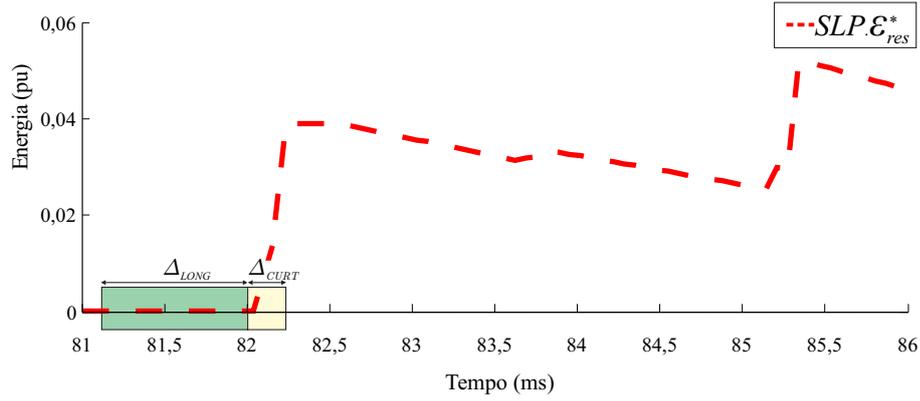


Figura 5.10. Janelas de detecção de distúrbios.

que toma como referência os valores estáveis de regime permanente das energias suavizadas, denominado de Fator de Sensibilidade (F_{SE}). A variação da \mathcal{E}^* para os coeficientes *wavelet* acontece de forma abrupta, de modo que, consegue-se detectar um distúrbio rapidamente tomando uma amostra do regime permanente sem falta e a amostra consecutiva, após a aplicação da falta, por isso foi definido um comprimento de Δ_{CURT_w} de 2 amostras. Ainda nos coeficientes *wavelet* a Δ_{LONG_w} é de 8 amostras que são suficientes para determinar que esses valores estão no regime permanente sem falta. Por outro lado, no caso da $\mathcal{E}_{v,res}^*$ tem-se uma variação mais suave uma vez que a falta acontece, por isso, a modo de garantir uma detecção de distúrbio com esse tipo de coeficientes a Δ_{CURT_v} tem um comprimento de 32 amostras, avaliando aproximadamente 2 ms do sinal, buscando variações importantes que permitam identificar um distúrbio. A Δ_{LONG_v} tem um comprimento de 190 amostras a fim de garantir uma boa margem de comparação com a janela curta.

O F_{SE} é calculado por meio da Equação (5.9), levando-se em consideração a janela de dados longa formada com valores de \mathcal{E}_{res}^* de pre-falta. As funções $\max\{\}$ e $\min\{\}$ retornam os valores máximo e mínimo da janela longa, respectivamente.

$$F_{SE,z,\phi}(k) = \frac{\max \left\{ \left[\mathcal{E}_{res,z,\phi}^*(k - \Delta_{LONG} - \Delta_{CURT} + 1), \dots, \mathcal{E}_{res,z,\phi}^*(k - \Delta_{CURT}) \right] \right\}}{\min \left\{ \left[\mathcal{E}_{res,z,\phi}^*(k - \Delta_{LONG} - \Delta_{CURT} + 1), \dots, \mathcal{E}_{res,z,\phi}^*(k - \Delta_{CURT}) \right] \right\}}. \quad (5.9)$$

Conforme observada na Figura 5.10, a janela de dados curta é contígua à janela de dados longa e tem como função principal detectar as variações abruptas das energias suavizadas. Para tanto, avalia-se a razão entre o último e o primeiro valores de energia armazenados na janela de dados curta:

$$\delta \mathcal{E}_{res,z,\phi}^*(k) = \frac{\mathcal{E}_{res,z,\phi}^*(k)}{\mathcal{E}_{res,z,\phi}^*(k - \Delta_{CURT} + 1)}, \quad (5.10)$$

sendo $\delta\mathcal{E}_{res,z,\phi}^*(k)$ a razão entre amostras de final e inicial da janela curta.

Por fim, avalia-se a seguinte condição:

$$\delta\mathcal{E}_{res,z,\phi}^*(k) > \eta_{SM}F_{SE,z,\phi}(k) \quad (5.11)$$

sendo η_{SM} um fator de sensibilidade, que evita que a detecção de distúrbios seja sensível a ruídos imersos nos sinais avaliados. Foi definido para os coeficientes *wavelet* um fator de sensibilidade de 5 e 1,01 para os coeficientes escala.

Se a condição da Equação 5.11 for satisfeita, então declara-se que distúrbios foram detectados, modificando para 1 (um) o estado lógico do *flag* de detecção $DT_{z,\phi}$, correspondente à zona de proteção z e a fase ϕ .

5.9 DETECÇÃO DE FALTA EXTERNA

De forma análoga ao que acontece com a função 87B baseada nos valores instantâneos das correntes (vide Seção 2.2), quando da ocorrência de um curto-circuito externo, a energia de restrição suavizada varia abruptamente, enquanto que a energia de operação permanece com valores aproximadamente iguais a zero, conforme ilustrado na Figura 5.11(a). Por outro lado, se o curto-circuito externo causa a saturação dos TCs, a energia de operação pode assumir valores maiores que os da energia de restrição suavizada durante os intervalos de saturação, conforme ilustrado na Figura 5.11(b), o que poderia resultar em atuações indevidas do algoritmo proposto. Esse comportamento é verificado tanto para as energias de operação e restrição suavizadas calculadas para os coeficientes *wavelet* como para as calculadas para os coeficientes escala.

Para contornar tal situação, o bloco **Falta Externa** implementa uma lógica de detecção de faltas externas, que é baseada naquela apresentada na Seção 2.2 para a função 87B. Basicamente, esse bloco recebe a informação do instante de detecção dos transitórios e inicia uma contagem de tempo. Para o elemento diferencial *wavelet*, no caso de $\mathcal{E}_{w,op,z,\phi}$ não ser superior a $SLP \cdot \mathcal{E}_{w,res,z,\phi}^*$ durante 2 ms após o transitório ter sido detectado, declara-se uma falta externa. Por outro lado, para o elemento diferencial escala, declara-se uma falta externa no caso de $\mathcal{E}_{v,op,z,\phi}$ não ser superior a $SLP \cdot \mathcal{E}_{v,res,z,\phi}^*$ durante 4 ms após o transitório ter sido detectado. São tomados esses valores porque, antes de esse tempo o fabricante do TC garante que não satura, no caso que uma saturação aconteça antes de um dos tempos estabelecidos, ela sera

muito severa.

Oportuno se faz mencionar que a detecção de falta externa é realizada de forma segregada por fase para cada zona de proteção z . Dessa forma, uma vez que a falta externa seja declarada, um *flag* $FE_{z,\phi}$ assume o estado lógico 1 (um). Esse *flag* é empregado nas lógicas de *trip* do algoritmo proposto, habilitando o chamado modo de operação de falta externa ou modo de operação seguro, conforme discutido na Seção 5.10.

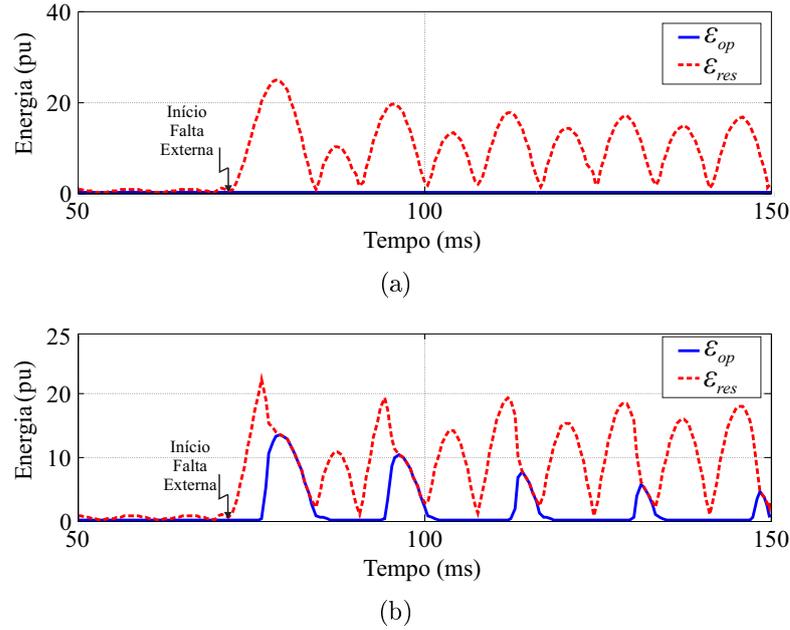


Figura 5.11. Energias de operação e restrição durante: (a) falta externa sem saturação de TC; (b) falta externa com saturação de TC.

5.10 LÓGICAS DE *TRIP*

No bloco *Lógica de Trip*, procede-se com o mapeamento para o domínio *wavelet* das tradicionais lógicas 1-de-1 e 2-de-2, discutidas na Seção 2.2. Basicamente, verificam-se as seguintes condições são satisfeitas para o elemento diferencial *wavelet*:

$$\mathcal{E}_{w,op,z,\phi} > \mathcal{E}_{w,op,min} \quad \text{e} \quad \mathcal{E}_{w,op,z,\phi} > SLP_w \cdot \mathcal{E}_{w,res,z,\phi}^* , \quad (5.12)$$

enquanto que para o elemento diferencial escala as condições a serem verificadas são as seguintes:

$$\mathcal{E}_{v,op,z,\phi} > \mathcal{E}_{v,op,min} \quad \text{e} \quad \mathcal{E}_{v,op,z,\phi} > SLP_v \cdot \mathcal{E}_{v,res,z,\phi}^* , \quad (5.13)$$

sendo $\mathcal{E}_{w,op,min}$ e $\mathcal{E}_{v,op,min}$ as energias mínimas para os coeficientes de operação *wavelet* e escala, respectivamente; SLP_w e SLP_v os *slopes* dos elementos diferenciais *wavelet* e escala, respec-

tivamente. Assim, da mesma forma que para o caso da função 87B tradicional, o algoritmo proposto avalia as condições das Equações (5.12) e (5.13) durante janelas de tempo (JT).

Para o caso do elemento diferencial *wavelet*, as lógicas de *trip* podem ser compreendidas a partir da análise da Figura 5.12, que representa uma forma hipotética das energias de operação e de restrição suavizada *wavelet* para uma falta interna ao barramento. Após o início da falta, ambas as energias de operação e de restrição suavizada sofrem uma variação abrupta. Logo em seguida, as condições de operação descritas na Equação (5.12) passam a ser satisfeitas durante um intervalo de tempo $L\Delta t$, sendo Δt o intervalo de amostragem, contabilizando uma janela de operação JT1. A contabilização da janela JT1 indica que a condição proposta para a lógica 1-de-1 no domínio *wavelet* foi satisfeita, permitindo que o algoritmo proposto emita um comando de *trip*.

Prosseguindo com a análise da Figura 5.12, após a contabilização da janela JT1, devido à forma de cálculo das energias, é de se esperar que as condições de operação descritas na Equação (5.12) possam se manter satisfeitas por um intervalo de tempo de até $2L\Delta t$, para logo após a energia de operação passar a ser menor que a de restrição suavizada. Em seguida, algum tempo depois, as condições de operação voltam a ser satisfeitas durante um intervalo de tempo $L\Delta t$, de modo a ser contabilizada a segunda janela de tempo JT2. No caso da diferença de tempo entre as contabilizações das janelas JT1 e JT2 ser inferior a $2t_{tran}$, sendo t_{tran} o tempo de trânsito da menor linha de transmissão conectada ao barramento, satisfaz-se a condição proposta para a lógica 2-de-2 no domínio *wavelet*, permitindo que o algoritmo proposto possa emitir um sinal de *trip*.

A partir da Figura 5.12, ao assumir um intervalo de tempo máximo de $2t_{tran}$ entre as contagens das janelas JT1 e JT2, tem-se como resultado um tempo de $2t_{tran} - 2L \cdot \Delta t + \delta$ entre os pulsos da energia de operação, sendo δ uma margem de segurança, que se faz necessária pelo fato de que nem sempre a energia de operação terá a forma ilustrada na Figura 5.12. Como consequência, tem-se uma delimitação da frequência de amostragem mínima que pode ser empregada com o algoritmo proposto, a saber:

$$f_s > \frac{2L + \delta}{2t_{tran}} . \quad (5.14)$$

Por exemplo, para $\delta = L$ e considerando-se o comprimento da menor linha igual a 180 km ($t_{tran} = 0,6$ ms) e a *wavelet* mãe db4, tem-se que f_s tem que ser, necessariamente, superior a

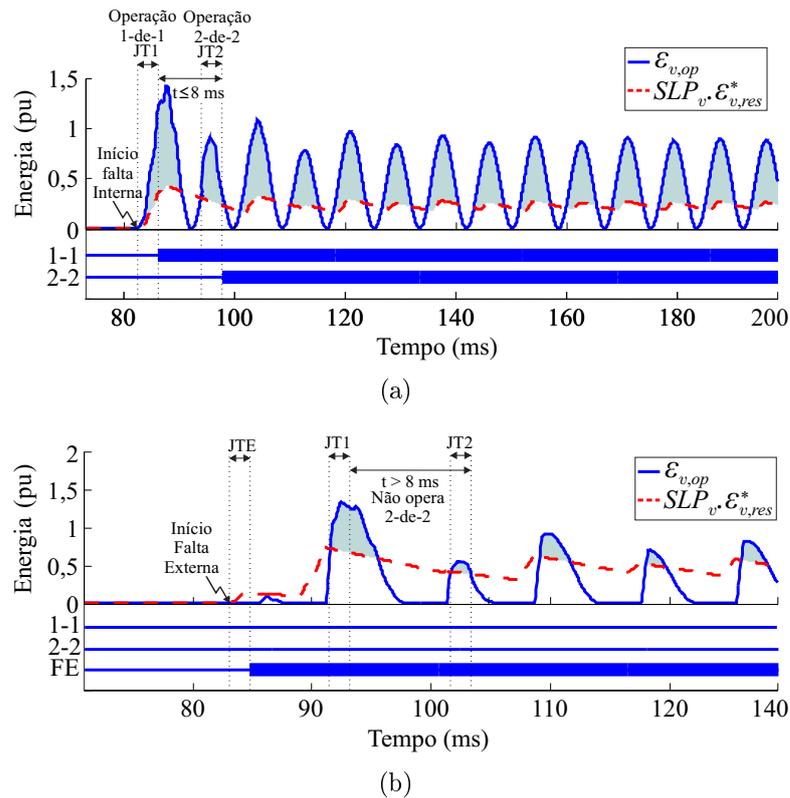


Figura 5.13. Avaliação das lógicas de *trip* para: (a) falta interna; (b) falta externa com saturação de TC.

interno ao barramento, evidenciando-se a contabilização das janelas de tempo e a operação das lógicas 1-de-1 e 2-de-2 propostas. Já na Figura 5.13(b) apresenta-se o comportamento do elemento diferencial escala para uma situação de curto-circuito externo com saturação de TC. O uso das lógicas 1-de-1 e 2-de-2 em conjunto com a detecção de faltas externas confere segurança à operação desse elemento, da mesma forma que para a função 87B tradicional.

5.11 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo apresentou-se, de forma detalhada, o algoritmo proposto de proteção diferencial de barramentos usando a TWDR. Todas as etapas do método foram discutidas em detalhe, evidenciando-se a adequada representação das lógicas tradicionais da função 87B para o domínio *wavelet*, por meio da qual foram propostos os elementos diferenciais *wavelet* e escala.

De um modo geral, o elemento diferencial escala tem a função de promover a retaguarda do elemento diferencial *wavelet*, para situações nas quais, eventualmente, os transitórios são muito amortecidos, a ponto de não serem detectados pelo elemento *wavelet*. Entretanto, por se tratar de proteção de barramento, essa situação é pouco provável.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da avaliação do desempenho do esquema de proteção diferencial de barramentos proposto, usando a transformada TWDR como técnica para decisão de operação do esquema. A proteção opera baseada na comparação de energias de operação e restrição dos elementos diferenciais *wavelet* e escala. São avaliadas diversas condições típicas de falta que podem ocorrer em subestações com configuração flexível, levando em consideração a seleção adaptativa das zonas de proteção de cada barramento. Dentre os cenários avaliados, destacam-se os casos de: faltas internas, externas, externas com saturação de TC, faltas evolutivas e situações de transferência da proteção durante a manutenção de disjuntores. Para cada caso, as operações e os tempos de atuação são investigados por meio dos estados lógicos das variáveis de *trip* de cada fase para cada zona. Também avalia-se a influência da variação da taxa de amostragem dos sinais avaliados e da *wavelet* mãe utilizada no algoritmo, o que permitirá a identificação das condições mais adequadas para a função de proteção proposta.

6.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA ANALISADO

O sistema elétrico de potência modelado e avaliado na dissertação é apresentado na Figura 6.1, e consiste em uma subestação com configuração de barramento duplo de 230 kV com saída de disjuntor simples a cinco chaves em cada vão. Na subestação são conectadas quatro linhas de transmissão modeladas como perfeitamente transpostas, com parâmetros constantes na frequência, cada uma com 180 km de comprimento. Além das linhas, são considerados também dois transformadores de potência, resultando em um sistema de seis vãos de saída. Os parâmetros de sequência das linhas de transmissão e os parâmetros utilizados na modelagem dos transformadores são apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2. Os subscritos 0 (zero) e 1 (um) correspondem aos valores de sequência zero e positiva, respectivamente. Os sistemas conectados

aos terminais remotos dos vãos foram modelados por meio de circuitos equivalentes de Thévenin, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 6.3.

Um disjuntor de interligação de barras é usado no sistema modelado para manter conectadas as duas barras, permanecendo este fechado durante a operação normal do sistema. Essa conexão

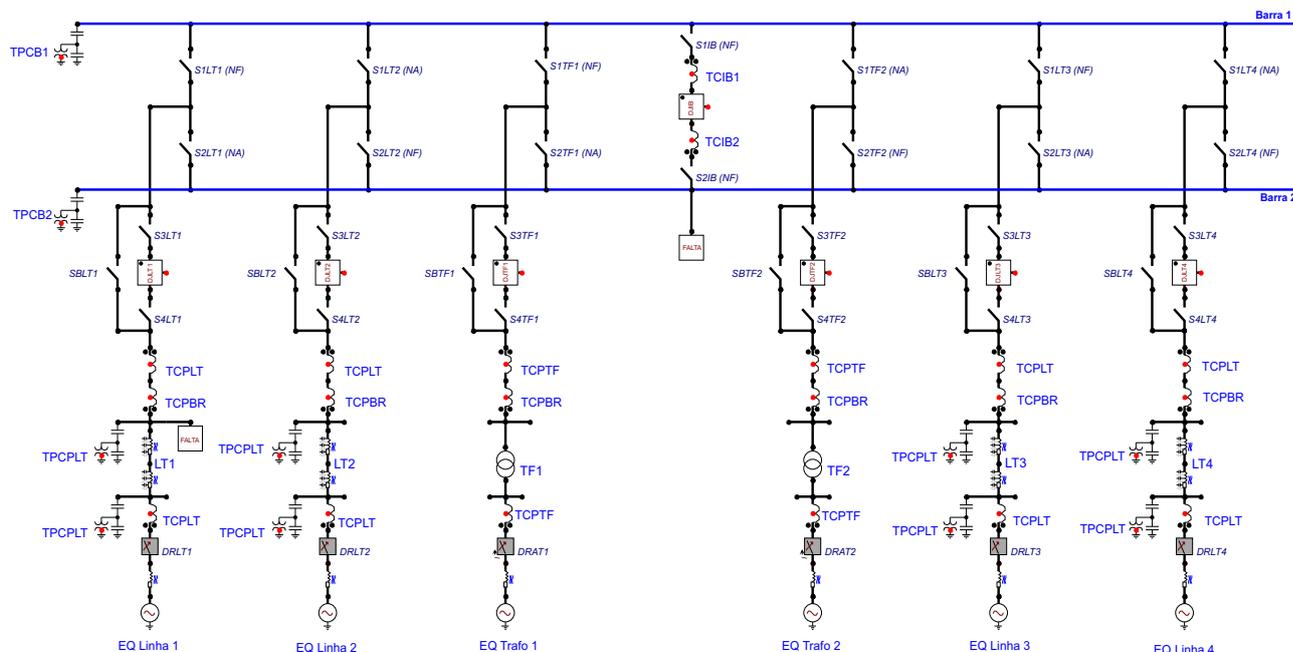


Figura 6.1. Diagrama unifilar da configuração com barra dupla com saída de disjuntor simples a 5 chaves.

Tabela 6.1. Parâmetros das linhas de transmissão.

$Z_0(\Omega/\text{km})$	$Z_1(\Omega/\text{km})$	$B_0(\mu\text{S}/\text{km})$	$B_1(\mu\text{S}/\text{km})$
$0,532 + j1,541$	$0,098 + j0,510$	2,293	3,252

Tabela 6.2. Parâmetros dos transformadores de potência.

Transformador	S (MVA)	Primário (kV)	Secundário (kV)
TF1	450	500 (Y)	230 (Y)
TF2	150	230 (Y)	69 (Δ)

Tabela 6.3. Parâmetros dos equivalentes remotos.

Equivalente	Tensão (pu)	$Z_0(\Omega)$	$Z_1(\Omega)$
Linha 1	$1,00\angle 0^\circ$	$16,07 + j25,04$	$12,05 + j18,78$
Linha 2	$1,00\angle -5^\circ$	$18,41 + j28,69$	$13,39 + j20,89$
TF1	$1,00\angle -5^\circ$	$28,07 + j43,74$	$18,71 + j29,16$
TF2	$1,00\angle 0^\circ$	$5,52 + j8,61$	$4,02 + j6,26$
Linha 3	$1,00\angle -10^\circ$	$18,42 + j28,69$	$13,39 + j20,87$
Linha 4	$1,00\angle 4^\circ$	$16,07 + j25,04$	$12,05 + j18,78$

é realizada com o objetivo de distribuir a carga de toda a subestação de forma uniforme em ambos os barramentos. O disjuntor de interligação de barras abre apenas se for verificada uma condição de falta interna à zona de proteção de uma das barras protegidas, sendo, portanto, um ponto de interseção das zonas de proteção relacionadas a cada barra.

Os sinais de corrente de cada terminal são obtidos dos enrolamentos secundários de TCs do tipo C800 1200-5 A. Para a modelagem desses TCs, tomou-se como base o modelo apresentado em IEEE Power System Relaying Committee (2004), considerando inclusive sua característica de saturação. Assim, as correntes secundárias dos TCs de cada fase e em cada elemento conectado ao barramento são usadas como dados de entrada no cálculo das grandezas de interesse para o esquema de proteção diferencial de barramentos proposto.

Para facilitar a modelagem do sistema e das diversas condições de operação a serem avaliadas, como casos de faltas internas, externas e de transferência de proteção, utilizou-se o módulo ATPDraw do ATP, assumindo um tempo máximo de simulação para todos os casos igual a 200 ms. Para todas as simulações, considerou-se um passo de integração de 1 μ s, correspondente a uma taxa de amostragem de 16667 amostras/ciclo. Os sinais simulados com essa taxa foram adotados como sendo os sinais "analógicos" no esquema de simulação empregado. Assim, para simular o processo de digitalização de sinais, são considerados filtros *anti-aliasing* Butterworth passa-baixas de 3ª ordem com uma frequência de corte em 5 kHz. Em seguida, os sinais filtrados pelos filtros *anti-aliasing* são reamostrados para uma taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo, ou seja, uma frequência de amostragem f_s igual a 15,36 kHz. Ao longo desse trabalho de dissertação, durante a análise da influência da taxa de amostragem, as taxas diferentes da supracitada serão devidamente informadas. Destaca-se ainda que, embora a maior parte das análises sejam realizadas para curtos francos, ao longo do presente trabalho, serão realizadas análises nas quais a resistência de falta R_{falta} será variada para fins de identificação de sua influência sobre o algoritmo proposto.

6.2 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para avaliar a função de proteção proposta, avalia-se a energia \mathcal{E}_{op} e a energia \mathcal{E}_{res}^* , sendo esta última ajustada no domínio tempo pelo slope SLP para cada zona de proteção. Em cada caso,

verifica-se a operação ou não do esquema proposto, seguindo as condições a serem satisfeitas que foram estabelecidas no Capítulo 4. O valor de slope utilizado na implementação do esquema de proteção é 0,4 para os coeficientes *wavelet* e 0,09 para escala, valores suficientes para manter estável o esquema de proteção em sinais com ruído e curtos externos com elevada saturação de TC. De outro lado, o valor de \mathcal{E}_{min} estabelecido foi de 0,0001 pu para avaliação dos elementos diferenciais *wavelet* e 1 pu para elementos diferenciais escala. Para obter operações rápidas durante a ocorrência de curto circuitos evolutivos e identificação de condições de saturação severa de TC utilizou-se um $t_{tran} = 1,2$ ms.

Para realizar uma avaliação mais detalhada dos resultados de cada simulação, analisam-se os estados lógicos das variáveis mais representativas do algoritmo proposto. Na Tabela 6.4 apresenta-se um resumo dos resultados para facilitar a identificação dessas variáveis, as quais sumarizam-se os instantes de detecção de distúrbios no sistema, de detecção de faltas externas ou do envio de *trip* proveniente de cada uma das lógicas associadas aos elementos diferenciais *wavelet* e escala. Neste trabalho, cada unidade de fase pode enviar comando de *trip* separadamente. No entanto, considerou-se a abertura tripolar dos disjuntores, a qual é comandada pela fase na qual a detecção do curto ocorre mais rapidamente.

Tabela 6.4. Representação dos estados lógicos nas figuras de estudo de caso.

Variável	Nome
DT	Detecção de transitórios
FE	Indicação de Falta Externa
1 – 1W	Operação 1-de-1 dos elementos diferenciais <i>wavelet</i>
2 – 2W	Operação 2-de-2 dos elementos diferenciais <i>wavelet</i>
1 – 1V	Operação 1-de-1 dos elementos diferenciais escala
2 – 2V	Operação 2-de-2 dos elementos diferenciais escala

Para validação dos resultados, os tempos de *trip* por parte do relé serão reportados, o qual é representado pela variável t_{trip} . Esse tempo será calculado como a diferença entre tempo de emissão de *trip* aos disjuntores associados e o tempo de aplicação da falta. Além disso, nos casos avaliados, apresenta-se também o tempo de detecção de falta externa, o qual é representado pela variável t_{fext} . Como a proteção é aplicada considerando elementos diferenciais escala e *wavelet*, os resultados para cada abordagem são apresentados em figuras separadas.

Na Tabela 6.5 reportam-se os casos simulados para avaliação do esquema de proteção proposto. Com o objetivo de avaliar de forma detalhada a operação do algoritmo, foi realizada

uma análise de sensibilidade paramétrica, na qual a principal condição de operação considerada foi o caso 1 detalhado na referida tabela. Com isso, tornou-se possível avaliar a velocidade da proteção em estudo para diferentes valores de resistência de falta, tipo de curto e ângulo de incidência de falta, viabilizando a identificação da *wavelet* mãe mais adequada para o algoritmo. Em relação ao estudo da influência das taxas de amostragem, considerou-se também o caso 1 da Tabela 6.5, porém, assumindo um curto interno franco do tipo AT.

Tabela 6.5. Cenários de falta avaliados.

Caso	Descrição
1	Curto-circuito monofásico interno na Barra 1, Zona 1
2	Curto-circuito trifásico interno adjacente ao DJIB
3	Curto-circuito trifásico interno durante uma situação de paralelismo de Barra
4	Curto-circuito monofásico externo sem saturação de TC, na LT2, Zona 2
5	Curto-circuito monofásico externo com saturação de TC, na LT1, Zona 1
6	Curto-circuito evolutivo externo para interno
7	Curto-circuito monofásico interno na LT1, Zona 1, com proteção transferida

6.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA *WAVELET* MÃE

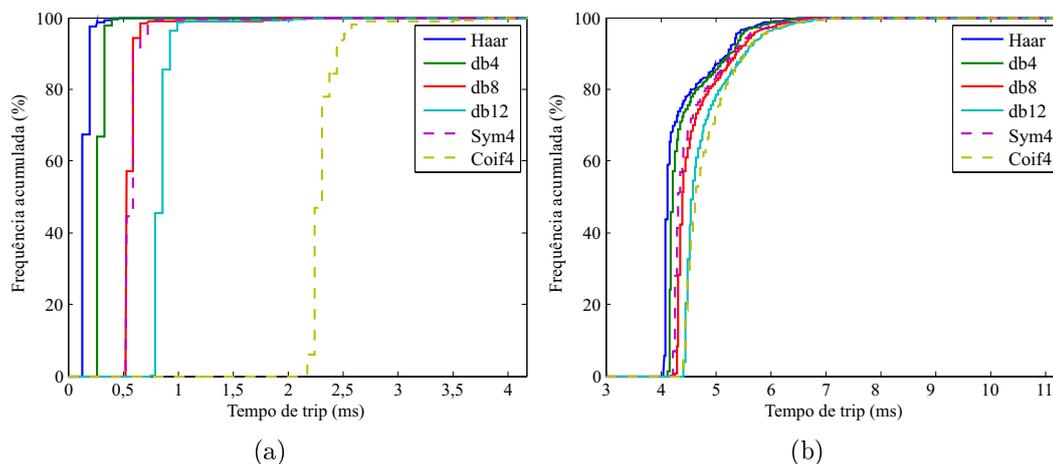
Para evidenciar diferenças nos tempos de atuação da proteção proposta, realizam-se análises considerando a variação de parâmetros de simulação do caso 1 de falta interna, conforme descrito na Tabela 6.5. A ideia principal desse teste é viabilizar a escolha da *wavelet* mãe a ser adotada no algoritmo proposto, com base nas atuações mais rápidas e confiáveis obtidas durante a análise de diferentes *wavelets* mãe. As grandezas variadas para o referido conjunto de simulações são apresentadas na Tabela 6.6, resultando em um total de 2200 casos. Para cada cenário, os tempos de atuação do algoritmo proposto foram obtidos utilizando as *wavelets* mãe Haar, db4, db8, db12, Sym4 e Coif4.

Os resultados obtidos são apresentados na forma de polígonos de frequência acumulada na Figura 6.2. Esses polígonos consistem em uma ferramenta estatística que permite a visualização da porcentagem de faltas detectadas em relação ao tempo de *trip* para cada caso. Para esses testes, foram consideradas apenas faltas internas à Barra 1.

Da Figura 6.2(a), a transformada Haar resulta em tempos de atuação muito baixos. Para essa *wavelet* mãe, o tempo máximo de operação foi de 0,133 ms usando a lógica de atuação

Tabela 6.6. Dados usados na análise da variação paramétrica.

Parâmetros	Valores	Casos aplicados
Ângulo de incidência ($^{\circ}$)	0, 18, 36 \dots , 324, 342, 360	20
Resistência de falta (Ω)	0, 20, 40 \dots , 160, 180, 200	11
Tipo de curto	AT, BT, CT, AB, BC, AC, ABT, BCT, ACT, ABC	10

**Figura 6.2.** Análise da variação paramétrica em curto interno com elementos diferenciais : (a) *wavelet* (b) Escala.

1-de-1 em aproximadamente 67 % dos casos simulados, enquanto que para a *wavelet* mãe db4, para o mesmo percentual de casos, um tempo máximo de atuação igual a 0,269 ms. Considerando 100 % das atuações obtidas pela lógica 1-de-1, usando a db4, os tempos de atuação não excedem 0,397 ms. Por outro lado, para a *wavelet* mãe Haar, em 100% dos casos, o tempo máximo de operação foi de 0,66 ms, valor este maior do que o tempo obtido quando utilizada a db4. A *wavelet* Haar, permite atuações rápidas, pois possui apenas dois coeficientes. Por utilizar uma janela de dados de apenas duas amostras, teoricamente, essa *wavelet* mãe resulta em atrasos menores do que os verificados quando utilizadas outras funções base, requerendo também um menor esforço computacional (COSTA, 2014). Entretanto, o fator de qualidade dos filtros da *wavelet* db4 promove um melhor comportamento dos elementos diferenciais *wavelet*, extraíndo de forma mais precisa as componentes de alta frequência dos sinais monitorados. Adicionalmente a *wavelet* Haar é muito afetada por ruídos (COSTA, 2014). Com isso, justifica-se o fato do tempo de atuação da db4 para 100 % dos casos avaliados ser menor que o tempo obtido por meio da *wavelet* Haar.

O desempenho da proteção proposta quando utilizados os elementos diferenciais escala é ilustrado na Figura 6.2(b). Os tempos de operação são muito parecidos para as diferentes

wavelets mãe e, novamente, as atuações mais rápidas são obtidas quando utilizadas as funções Haar e a db4, enquanto que ao utilizar *wavelets* mãe com maior número de coeficientes, os atrasos são um pouco maiores (COSTA; DRIESEN, 2013). Dessa forma, o uso de diferentes *wavelets* influencia especialmente na atuação rápida do algoritmo proposto, a qual se baseia na análise de componentes de alta frequência. Por outro lado, esse mesmo impacto não tem mesma relevância nas atuações realizadas por meio da análise dos elementos diferenciais escala. Na Figura 6.3 ilustra-se a resposta em frequência dos filtros usados pela *wavelet* Haar e de diferentes *wavelets* da família *Daubechies*. Pode ser observado que, a *wavelet* Haar não filtra algumas frequências de menor ordem que a frequência de corte, o que pode levar a ter comportamentos indesejados com oscilações de baixa frequência, as quais são atenuadas de forma efetiva pelas *wavelets* da família *Daubechies* porque conforme aumenta o número de coeficientes L os filtros das *Daubechies* têm convergência de filtros passa-altas ideais.

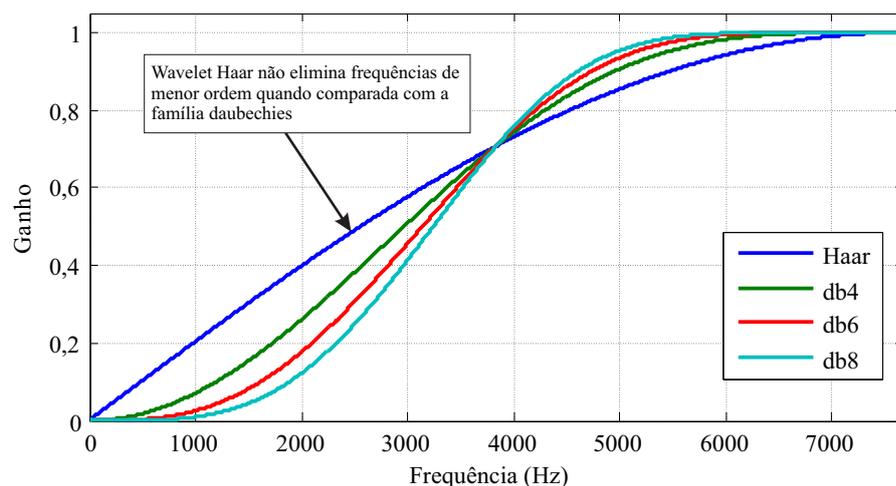


Figura 6.3. Comparação da resposta em frequência dos filtros de diferentes *wavelet* mãe.

Em uma segunda etapa da avaliação, foram analisados os tempos de operação da proteção diferencial de barramentos proposta para a mesma condição de curto circuito interno até então considerada, porém, utilizando as *wavelets* mãe db4, db6, db8, db10 e db12 na implementação da TWDR para cálculo dos elementos diferenciais *wavelet* e escala. Essa comparação é realizada para verificar a vantagem da db4 com relação a outras da família *Daubechies*, já que anteriormente foi verificado que ela apresenta melhor desempenho na operação rápida, pela lógica 1-de-1, avaliando unicamente os elementos diferenciais *wavelet*. Na Figura 6.4 são plotados os instantes em que \mathcal{E}_{op} é maior que $SLP \cdot \mathcal{E}_{res}^*$ para um curto iniciado em 82 ms.

Conforme ilustrado na Figura 6.4, evidencia-se que a *wavelet* mãe db4 promove uma melhor

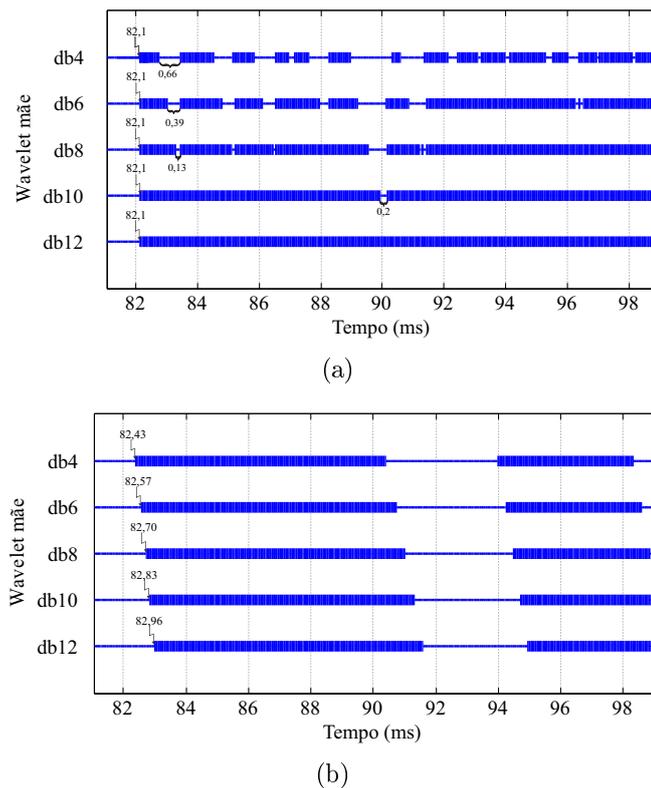


Figura 6.4. Análise da influência da variação da *wavelet* mãe, curto interno, elementos diferenciais : (a) *wavelet* (b) escala.

representação dos transitórios dentre as demais funções base avaliadas. Usando os elementos diferenciais *wavelet*, a falta é detectada rapidamente após o instante de sua incidência. Neste teste, para o caso particular de um curto circuito AT iniciado em 82 ms, a detecção da falta ocorreu em 82,1 ms pela lógica 1-de-1. Além disso, para um possível caso de curto evolutivo, a db4 também resultaria em um melhor desempenho, pois operaria também pela lógica 2-de-2. A *wavelet* mãe db12, por exemplo, é pouco influenciada por transitórios, de forma que mantém os valores de operação maiores que os de restrição durante toda a simulação, conforme ilustrado na Figura 6.5. Esse comportamento não é interessante para a lógica 2-de-2, visto que inviabiliza sua operação quando a lógica 1-de-1 é bloqueada. Conclui-se, portanto, que a \mathcal{E}_{op} para a db4 se torna maior que $SLP \cdot \mathcal{E}_{res}^*$ mais rapidamente do que para as outras *wavelets* mãe, sem comprometer a atuação 2-de-2, o que assegura atuações rápidas para curtos internos à zona de proteção, mantendo a segurança em casos, por exemplo, de faltas que evoluem de externas para internas.

Na Tabela 6.7 apresentam-se os tempos de atuação pelas lógicas 1-de-1 e 2-de-2 para o curto AT simulado. Conforme mencionado anteriormente, se um curto evolutivo acontecer e

o algoritmo estiver utilizando as *wavelets* mãe db10 e db12, a atuação pela lógica 2-de-2 será afetada, gerando atrasos significativos ou mesmo resultando na não sensibilização da referida lógica.

6.4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA TAXA DE AMOSTRAGEM NA PROTEÇÃO DE BARRAMENTOS

Foram avaliadas simulações de um caso pontual de falta externa AT na Z_1 iniciada em 82 ms. A ideia é fazer uma comparação da influência da taxa de amostragem sobre a velocidade de atuação da proteção do esquema proposto. Foram plotados na Figura 6.6 intervalos da simulação em que os valores de \mathcal{E}_{op} estão acima dos valores de $SLP \cdot \mathcal{E}_{res}^*$. A partir da análise da Figura 6.6 o tempo em que $\mathcal{E}_{op} > SLP \cdot \mathcal{E}_{res}^*$ diminui com o aumento da taxa de amostragem. Para uma taxa de amostragem de 64 amostras/ciclo, desde o primeiro instante que \mathcal{E}_{op} se torna maior que $SLP \cdot \mathcal{E}_{res}^*$, esta condição não se altera, comprometendo a operação da proteção pela lógica de 2-de-2. Como consequência, a proteção como um todo se torna menos segura, visto que o tempo entre duas contagens necessário para a emissão do *trip* não é alcançado.

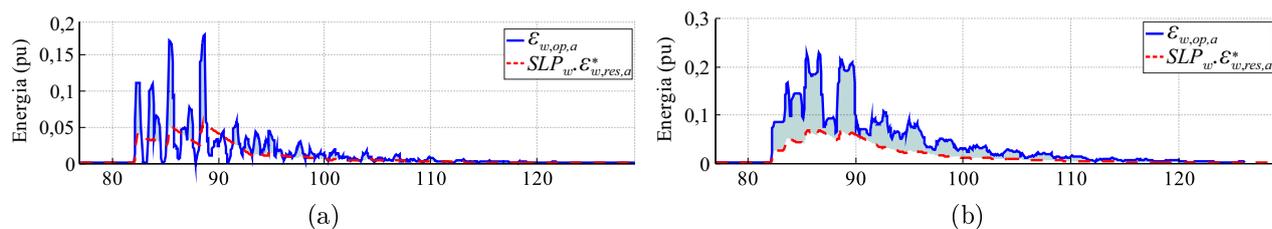


Figura 6.5. Comparação dos transitórios gerados para diferentes *wavelet* mãe, elemento diferencial *wavelet* da TWDR : (a)db4 ; (b)db12.

Tabela 6.7. Influência da variação da *wavelet* mãe, em curto interno.

Wavelet mãe	1 – 1 w (ms)	2 – 2 w (ms)	1 – 1 v (ms)	2 – 2 v (ms)
db(4)	0,26	1,58	4,42	23,03
db(6)	0,4	1,72	4,62	23,23
db(8)	0,53	1,85	4,75	23,50
db(10)	0,66	40,15	4,88	23,69
db(12)	0,79	70,95	5,02	23,96

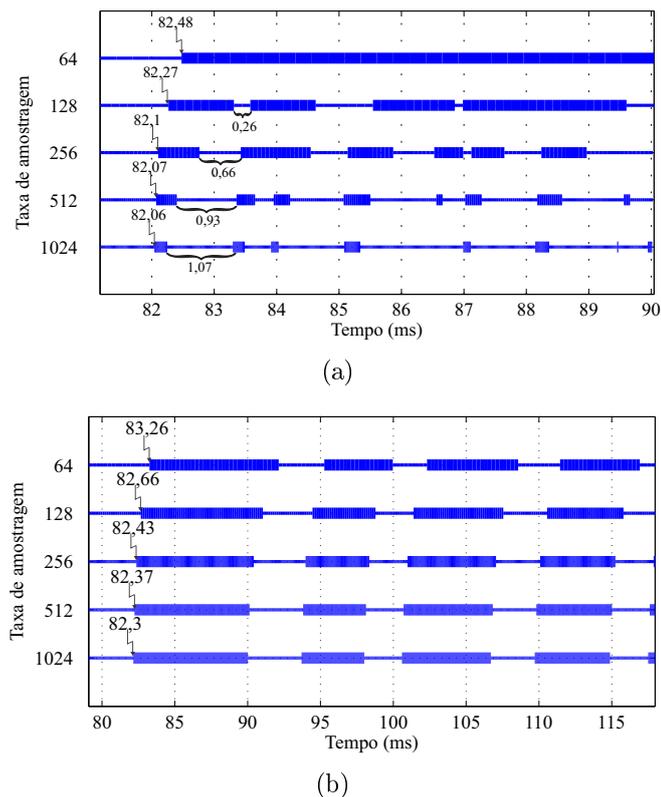


Figura 6.6. Análise da influência da variação da taxa de amostragem em curto interno, elementos diferenciais: (a) *wavelet* (b) Escala.

Conforme a Figura 6.7 ao usar baixas frequências de amostragem, os transitórios dos sinais são bastante filtrados, camuflando o comportamento real de \mathcal{E}_{op} . Para uma taxa de 64 amostras/ciclo, tem-se uma forte influência da componente de frequência fundamental visto que a resposta em frequência dos filtros *wavelet* não é de um filtro ideal (COSTA, 2014). Além disso, \mathcal{E}_{op} ultrapassa a $SLP \cdot \mathcal{E}_{res}^*$ logo depois da ocorrência da falta, não mudando esta condição ao longo de todo o curto, razão pela qual a operação por 2-de-2 fica comprometida no caso de faltas evolutivas. No caso de uma taxa de amostragem de 1024 amostras/ciclo os transitórios são representados com uma melhor resolução no tempo, melhorando a segurança da proteção, conforme ilustrado na Figura 6.7.

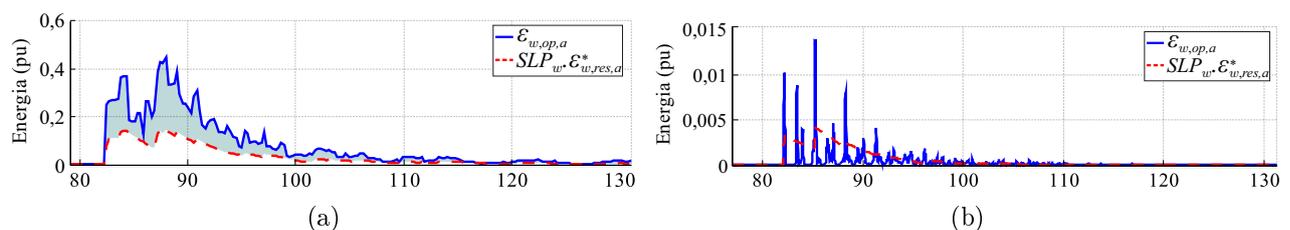


Figura 6.7. Comparação dos transitórios gerados para diferentes taxas de amostragem, elementos diferenciais wavelet : (a) 64 amostras/ciclo; (b) 1024 amostras/ciclo.

Para os elementos diferenciais escala, o desempenho com todas as taxas de amostragem é similar porque os coeficientes escala do primeiro nível de resolução são afetados diretamente por uma componente dominante de frequência fundamental. Verificou-se que, a atuação pela lógica 1-de-1 é mais rápida com o aumento da taxa de amostragem. Na Tabela 6.8 apresenta-se a avaliação de simulações de casos pontuais variando a taxa de amostragem. Mesmo com a influência da componente fundamental para a taxa de amostragem 128 amostras/ciclo sobre as energias de operação e restrição, a proteção oferece segurança na atuação. No caso da taxa de 64 amostras/ciclo, para um curto evolutivo, se os elementos diferenciais *wavelet* não atuam pela lógica 2-de-2, a atuação por meio dos elementos diferenciais escala é mantida, operando com tempos semelhantes à operação da proteção diferencial tradicional baseada em correntes. Assim, com base nas análises realizadas, adota-se na função de proteção proposta o uso da TWDR com base na *wavelet* mãe db4, usando uma taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo, a qual é usada em diversos registradores de perturbações instalados em sistemas elétricos de potência reais, podendo também ser empregado em relés numéricos.

Tabela 6.8. Influência da variação da taxa de amostragem, curto interno.

N	f_S	1 – 1 w (ms)	2 – 2 w (ms)	1 – 1 v (ms)	2 – 2 v (ms)
64	3840	1,04	–	4,7	23,75
128	7860	0,65	1,97	4,59	23,32
256	15360	0,26	1,58	4,42	23,03
512	30720	0,17	1,45	4,36	22,84
1024	61440	0,09	1,34	4,30	22,75

6.5 ANÁLISE DO EFEITO DE PRESENÇA DE RUÍDO NOS SINAIS

Todos os sinais de correntes obtidos dos secundários dos TCs de cada vão foram afetados um ruído gaussiano branco de relação sinal ruído (*SRN*) de 40 dB. As avaliações são desenvolvidas para o mesmo caso de simulação de curto interno apresentado nas simulações anteriores. Avaliou-se a detecção de distúrbios, mostrando que para transformadas *wavelet* de mais de quatro coeficientes as fases de envolvidas no curto interno detectaram o distúrbio no instante correto. A *wavelet* Haar apresentou-se sensível ao ruído, detectando distúrbios em tempos anteriores ao da aplicação da falta, inclusive detectando distúrbios em fases sãs. Os sinais de energias de operação e restrição dos coeficientes *wavelet* apresentam fortes oscilações e as dos

coeficientes escala mantem um comportamento mais estável, pouco influenciadas pelo ruído inserido.

6.6 CURTOS-CIRCUITOS APLICADOS NO SISTEMA

6.6.1 Caso 1: Curto-Circuito Monofásico Interno na Barra 1, Zona 1

Durante uma falta monofásica franca AT no barramento 1, iniciada em 80 ms, os elementos conectados nesse barramento devem enviar comandos de *trip* aos disjuntores dos vãos conectados na Z_1 . Conforme mencionado anteriormente, considera-se nesse trabalho a abertura tripolar dos disjuntores, de modo que, embora nessa simulação a única unidade de fase que detecta a falta seja a da fase A, as três fases são seccionadas após a detecção do curto. Além disso, o DJIB também abre, mantendo energizados os vãos conectados à zona Z_2 . Para os elementos diferenciais de operação e restrição, os valores de energia da fase com falta são maiores que nas fases sãs. Na Figura 6.8(a) na Z_1 , a energia de operação dos elementos diferenciais *wavelet* ($\mathcal{E}_{w,op,a}$) ultrapassa a energia de restrição suavizada ($\mathcal{E}_{w,res,a}^*$) em vários instantes de tempo, superando também o valor de \mathcal{E}_{min} . Logo após o início da falta em 80 ms, $\mathcal{E}_{w,op,a}$ é mantida acima da $SLP \cdot \mathcal{E}_{w,res,a}^*$ durante um intervalo suficiente para indicar uma condição de falta. Portanto, por meio da lógica de atuação 1-de-1, o relé gera um comando de *trip* pela unidade diferencial da fase A em $t_{trip} = 0,26$ ms, o qual é enviado aos disjuntores dessa zona. Enquanto isso, as demais unidades de fase não emitem comandos de *trip*, ficando *flag* de falta externa estável e em nível lógico baixo. Assim, só as fases com falta detectam o distúrbio como interno, enquanto que as outras identificam apenas uma elevação de $\mathcal{E}_{w,res}^*$. A $\mathcal{E}_{w,op}$ apresenta valores desprezíveis, assim como acontece com todas as unidades de fase da Z_2 , as quais detectam a falta como sendo externa em $t_{fext} = 2,1$ ms após a ocorrência da falta.

O comportamento supracitado está de acordo com o esperado e é ilustrado na Figura 6.8(b). Para a zona Z_2 , os flags de detecção de falta das lógicas 1-de-1 e 2-de-2 permanecem com valor lógico nulo, uma vez que o tempo de segurança de 150 ms foi ativado após a detecção de uma condição de falta externa. Com isso, a atuação rápida da proteção é bloqueada, enquanto que a lógica 2-de-2 permanece funcionando em paralelo. Deve-se destacar que no exemplo ilustrado, para a zona Z_2 , a lógica 2-de-2 não atua, pois os valores de $\mathcal{E}_{w,op}$ não ultrapassaram os valores

da restrição para nenhuma das unidades de fase durante nenhum momento da simulação.

Analisando os elementos diferenciais escala, a falta também é detectada pela unidade da fase A em 4,42 ms por meio da lógica 1-de-1, conforme apresentado na Figura 6.9(a). Além disso, a lógica 2-de-2 seria capaz de detectar a falta em $t_{trip} = 41,51$ ms. Essa atuação relativamente tardia se explica pelo fato da primeira contagem de uma janela de tempo ser alcançada rapidamente após a incidência do curto, sem que exista uma segunda contagem no semi-ciclo posterior. Essa condição de duas contagens consecutivas dentro de um período de um semi-ciclo só ocorre no segundo ciclo da simulação, gerando o comando de *trip* no tempo indicado. Igualmente aos elementos diferenciais *wavelet* da Z_1 , para Z_2 , a \mathcal{E}_{res}^* de todas as fases apresentam incrementos dos seus valores, enquanto que \mathcal{E}_{op} permanece com valores desprezíveis, mantendo estável a proteção, conforme apresentado na Figura 6.9(b).

Para o caso ilustrado, de uma forma geral, considerando as operações por meio dos elementos diferenciais *wavelet* e escala, os disjuntores DJLT1, DJLT3, DJTF1 e o DJIB abrem com a condição de falta. De outro lado, os disjuntores DJLT2, DJLT4 e DJTF2 da Z_2 permanecem em operação. O esquema de proteção notou-se estável para as fases e zonas onde a falta não foi aplicada, mas a atuação foi muito rápida na zona de ocorrência da falta.

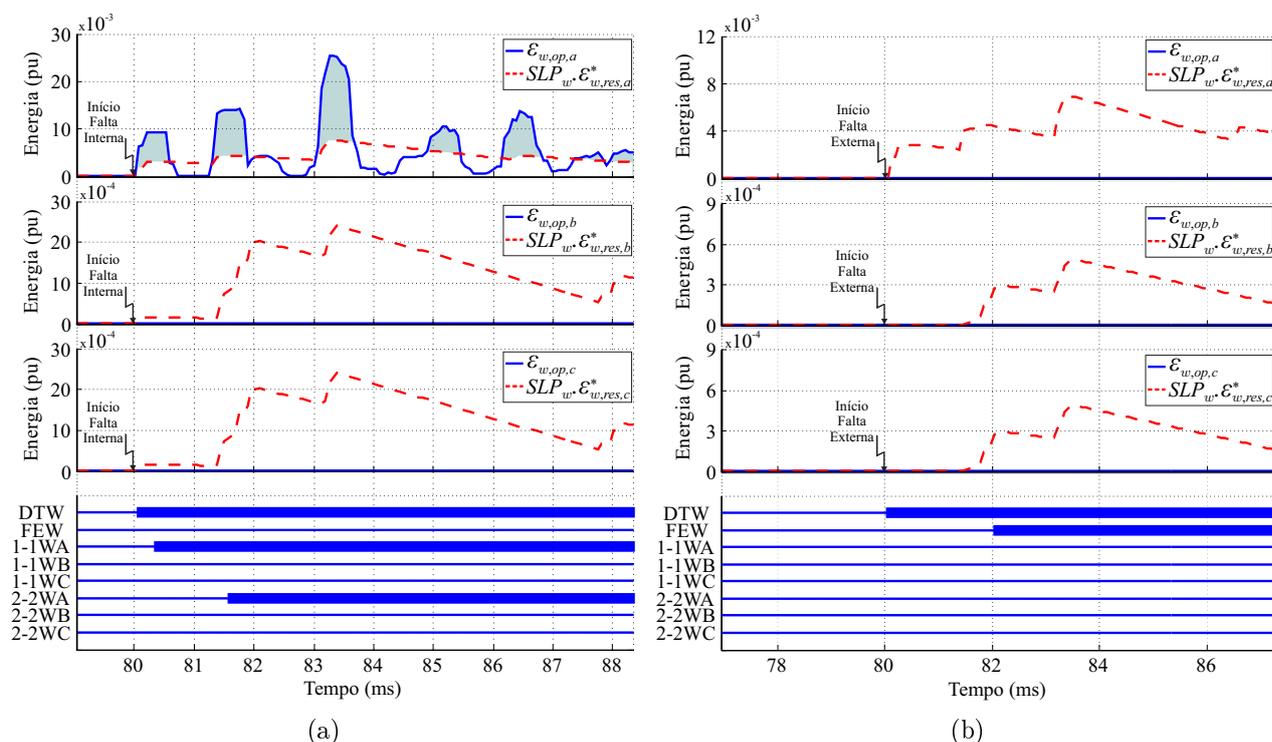


Figura 6.8. Caso 1, Energias dos elementos diferenciais *wavelet* : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2.

6.6.2 Avaliação da Variação Paramétrica do Caso 1

O desempenho do esquema de proteção foi avaliado por meio de análise de variação paramétrica, principalmente para examinar o tempo de atuação da proteção durante um curto-circuito interno, sendo esta a condição na qual a proteção atua em tempos mais rápidos. Com esta análise, busca-se verificar se as parametrizações do esquema de proteção de barramentos são as indicadas para este tipo de curto. São variados parâmetros de simulação como ângulo de incidência e resistência de falta de forma independente, testando duas condições que podem afetar principalmente a operação rápida pelos coeficientes *wavelet*. A localização da falta é mantida em um ponto da B₁, em virtude de que ela não oferece maior informação na proteção de barramentos, devido a que este é considerado eletricamente como o mesmo ponto.

6.6.2.1 Efeito da Variação do Ângulo de Incidência de Falta na Detecção de Falhas Internas

O ângulo de incidência foi variado de 0,5 a 360° a passos de 0,5°. Na Figura 6.10 são mostrados os tempos de atuação obtidos de um total de 720 simulações aplicadas sob esta

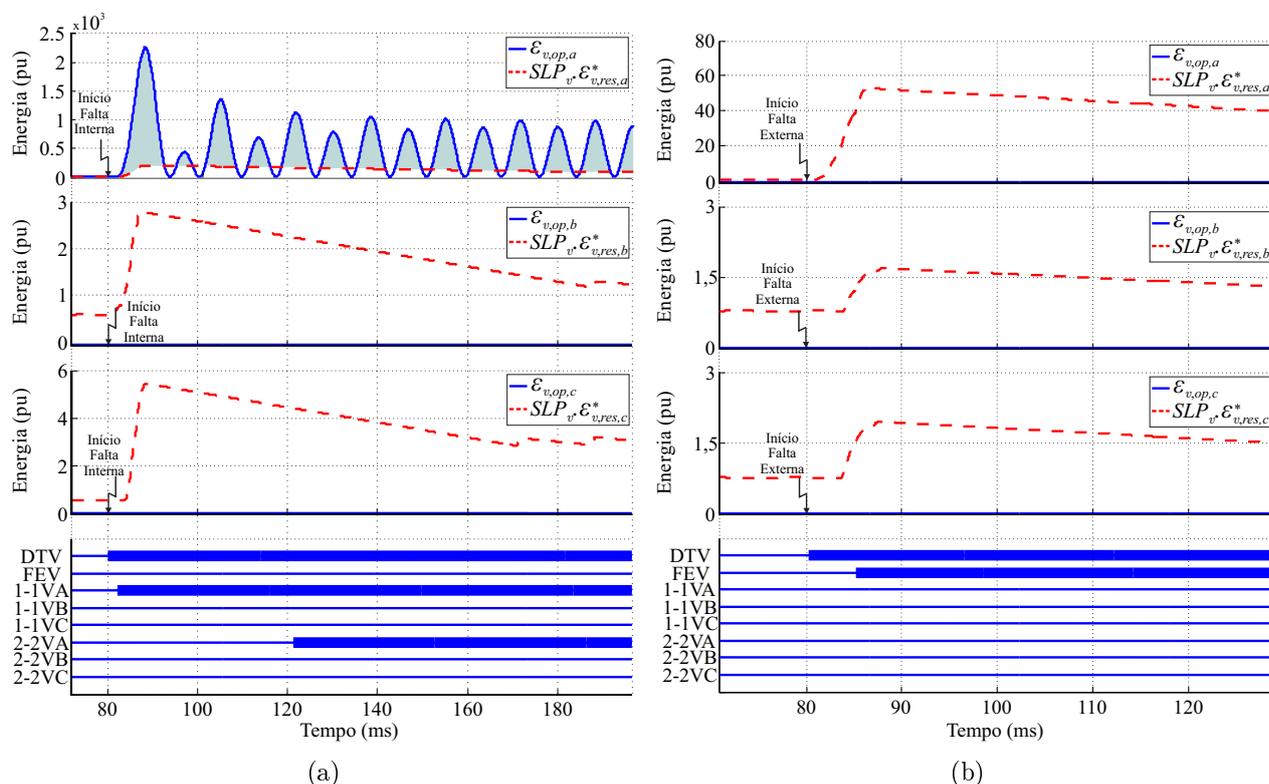


Figura 6.9. Caso 1, Energias dos elementos diferenciais escala : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2.

condição. Os coeficientes *wavelet* operam em um tempo mínimo de 0,26 ms pela lógica 1-de-1, mas em alguns instantes o tempo pode aumentar a 0,339 ms. De outro lado, os elementos diferenciais escala mantem operações em mais de 4 ms

Como ponto positivo, destaca-se que, os elementos diferenciais *wavelet* não são influenciados pelos ângulos de incidência da falta, enviando comando de *trip* no 100% dos casos analisados, mesmo sendo este caso (falta AT) um onde poderia haver dificuldade para detecção de faltas em ângulos como 0 e 180°.

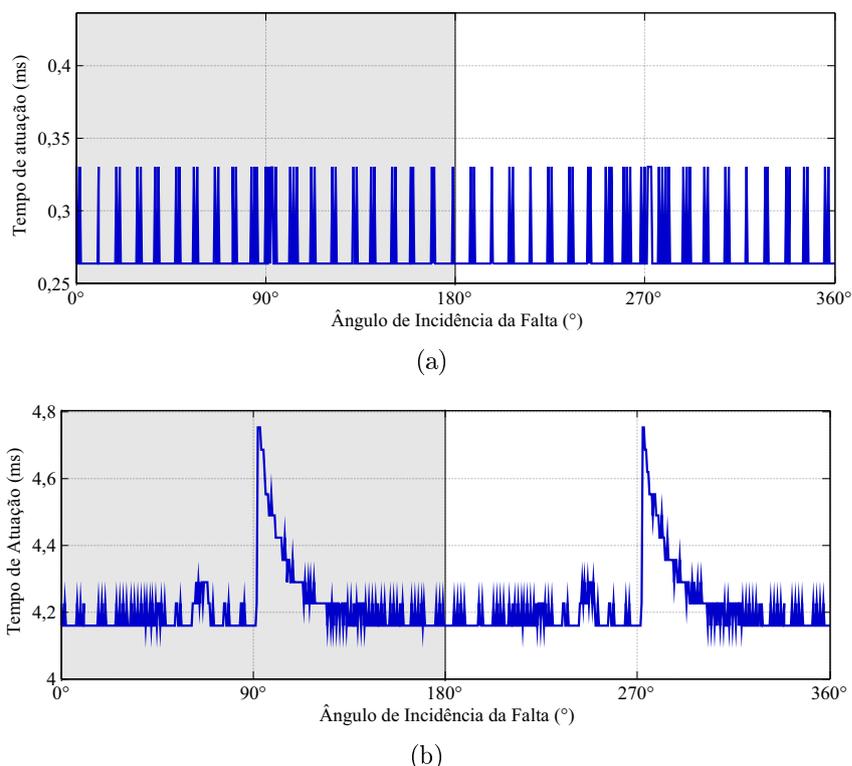


Figura 6.10. Tempo de atuação durante a análise de sensibilidade paramétrica do caso 1, variação do ângulo de incidência da falta : (a) 1-de-1 *w* ; (b) 1-de-1 *v*.

A Figura 6.11 apresenta o histograma de frequência relativa dos elementos diferenciais *wavelet* e escala, nela são plotados os número de casos e seu instante de atuação. Esses resultados são apresentados dessa forma devido a que não acompanham o comportamento para aproximação de uma função de distribuição normal. De acordo com a Figura 6.11, a proteção atua 87,92% em tempos muito rápidos, concentrando uma grande quantidade de detecções perto no mínimo de 0,26 ms para elementos diferenciais *wavelet* e um 56,3% atua em mais de 4,1 ms para elementos diferenciais escala, quando são avaliadas as 720 simulações.

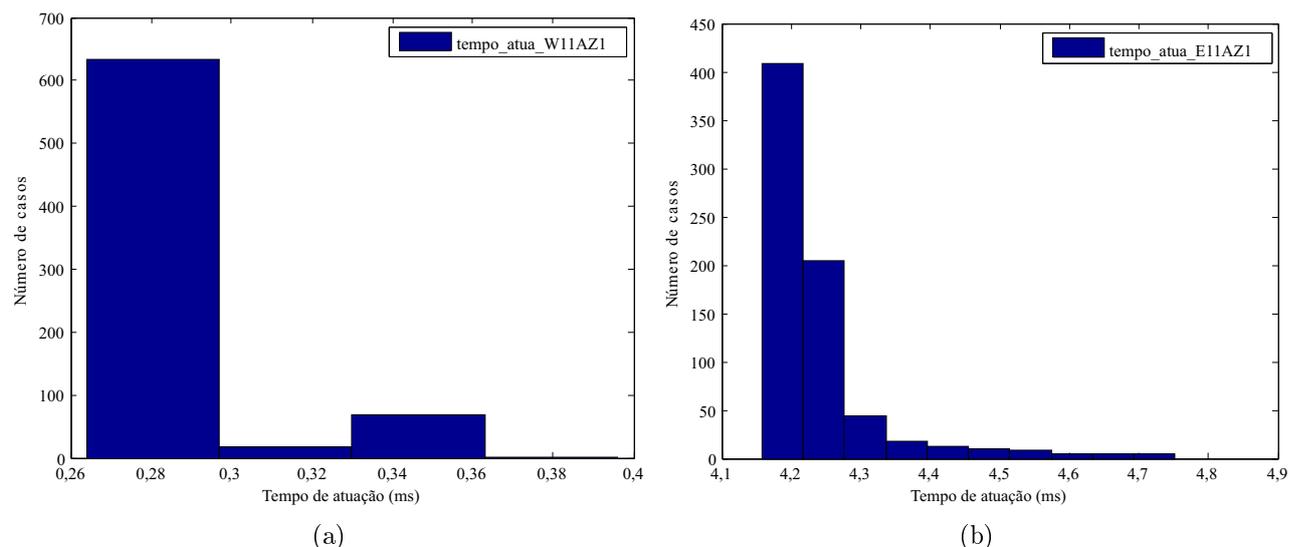


Figura 6.11. Histograma de frequência relativa do tempo de atuação pela lógica 1-de-1 para variações de ângulo de incidência durante um curto interno: (a) Coeficientes *wavelet*; (b) coeficientes escala.

6.6.2.2 Efeito da Variação da Resistência de Falta na Detecção de Falhas Internas

Para realizar a avaliação da influência do valor da resistência de falta (R_{falta}), variou-se esse parâmetro desde 0Ω até um valor de 100Ω em intervalos de 5Ω . Um total de 21 casos de simulação foram gerados, obtendo um tempo de atuação da proteção de $0,26$ ms, após a aplicação da falta. Considerando que os valores de R_{falta} simulados para esta avaliação são altos, ao interior de uma subestação esses altos valores de resistência não inibem a atuação da proteção, mantendo sempre a operação rápida pelos coeficientes *wavelet* no tempo mencionado antes. No caso que exista amortecimentos dos transitórios da energia eles não alcançam a ser suficientemente severos para que o esquema não dificulte a detecção da falta.

Por outro lado, a operação pelos coeficientes escala sofrem uma certa variação na detecção da falta, como apresentado na Figura 6.12, onde é ilustrado o histograma de frequência relativa dos tempos de operação usando os elementos diferenciais escala, mostrando que 4 das 41 atuações está entre $4,75$ e $4,8$ ms. Nestes coeficientes a R_{falta} no tempo de atuação da proteção, gerando atrasos, que não são importantes devido a que os elementos diferenciais *wavelet* já operaram em um tempo curto, enviando comando de *trip* pela fase A a todos os disjuntores da Z_1 em $0,26$ ms.

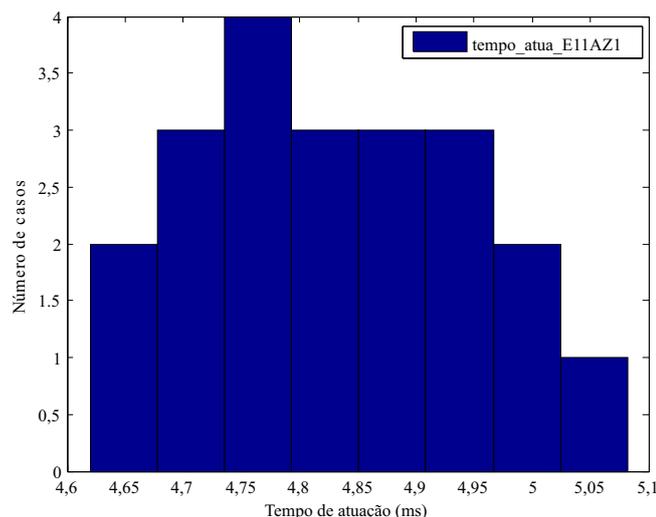


Figura 6.12. Histograma de frequência relativa à atuação 1-de-1 pelo elemento diferencial escala da Z_1 durante um curto interno.

6.6.3 Caso 2: Curto-Circuito Trifásico Interno Adjacente ao DJIB

Neste caso 2, um curto-circuito localizado ao lado do disjuntor DJIB é aplicado. O curto ocorre em uma região do sistema de potência onde as duas zonas de proteção Z_1 e Z_2 estão sobrepostas, de forma que espera-se que a proteção diferencial envie um comando de *trip* para abertura dos disjuntores de ambas as zonas. Neste caso, considera-se um curto trifásico franco aplicado em 80 ms.

Para esta simulação, todos os disjuntores da subestação recebem comandos de *trip* pela lógica 1-de-1 de todas as unidades de fase em um tempo $t_{trip} = 0,32$ ms para a operação da proteção pelos elementos diferenciais *wavelet*, mas a atuação pela lógica 2-de-2 é alcançada em $t_{trip} = 1,58$ ms, conforme apresentado na Figura 6.13. Para os elementos diferenciais *wavelet*, as unidades das três fases operam de forma simultânea segundo as lógicas 1-de-1 e 2-de-2. Por outro lado, para o caso dos elementos diferenciais escala, conforme apresentado na Figura 6.14, a atuação pela lógica 1-de-1 ocorre em 4,28 ms após a ocorrência da falta, atuando com a unidade diferencial da fase B, correspondendo à fase que mais rápido. No entanto, se a proteção tivesse operado unicamente pela lógica 2-de-2, o *trip* seria enviado aos disjuntores de ambas as zonas de proteção em 22,04 ms após a ocorrência da falta, sendo esta classificada pela unidade da fase B como interna. Durante esta condição de falta todos os disjuntores abrem e a subestação sofre um desligamento geral. O esquema confirma que é seguro e estável, além de rápido para as atuações.

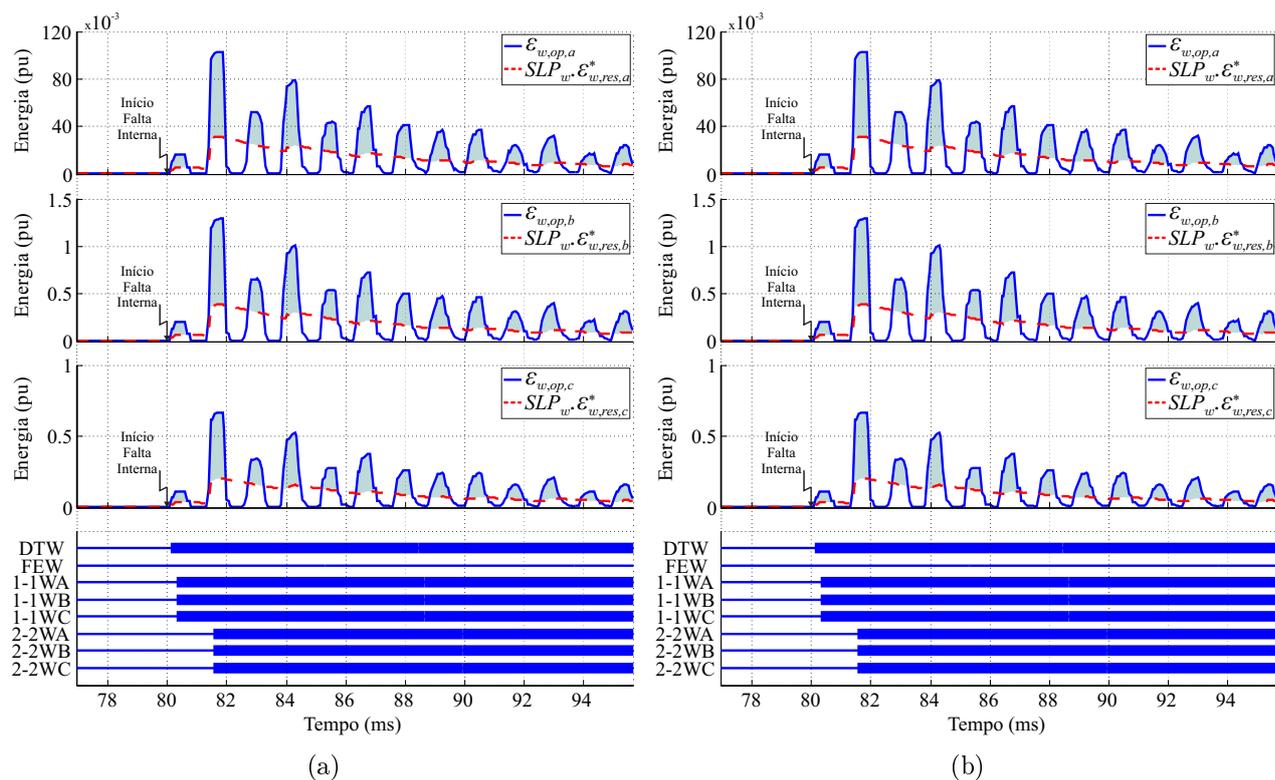


Figura 6.13. Caso 2, Energias dos elementos diferenciais *wavelet* : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2.

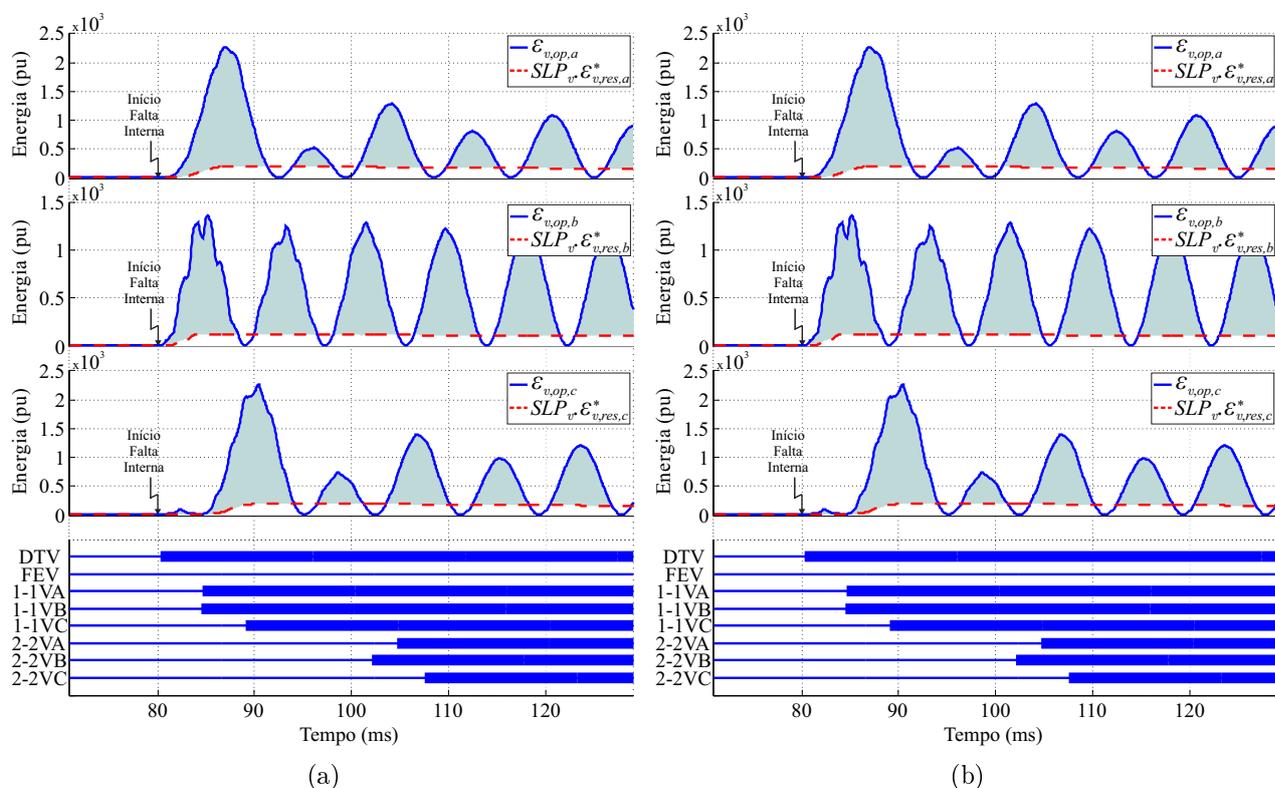


Figura 6.14. Caso 2, Energias dos elementos diferenciais escala : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2.

6.6.4 Caso 3: Curto-Circuito Trifásico Interno Durante uma Situação de Paralelismo de Barra

Esta condição de operação acontece durante uma transferência de um vão de um barramento para outro. Por um curto espaço de tempo, as chaves seccionadoras seletoras de barras ficam com seus contatos fechados simultaneamente, garantindo uma conexão direta entre ambas as barras, sem a necessidade de interromper o fornecimento de energia durante a manobra de transferência de um vão de uma barra para a outra.

O comportamento das unidades de fase para esse caso é muito semelhante ao verificado no Caso 2 anteriormente analisado, conforme ilustrado nas Figuras 6.15 e 6.16. Nesta análise, uma falta trifásica foi aplicada em 80 ms na Z_1 durante uma situação de paralelismo de barras, de modo que os disjuntores de toda a subestação recebem comandos de *trip* gerados da análise dos elementos diferenciais *wavelet* e escala. A abertura de todos os disjuntores se justifica pelo fato da proteção enxergar uma falta nas duas zonas de proteção (Z_1 ou Z_2). Além disso, a proteção também detecta a falta por meio da zona que engloba toda a subestação, ou seja, a zona Z_{12} .

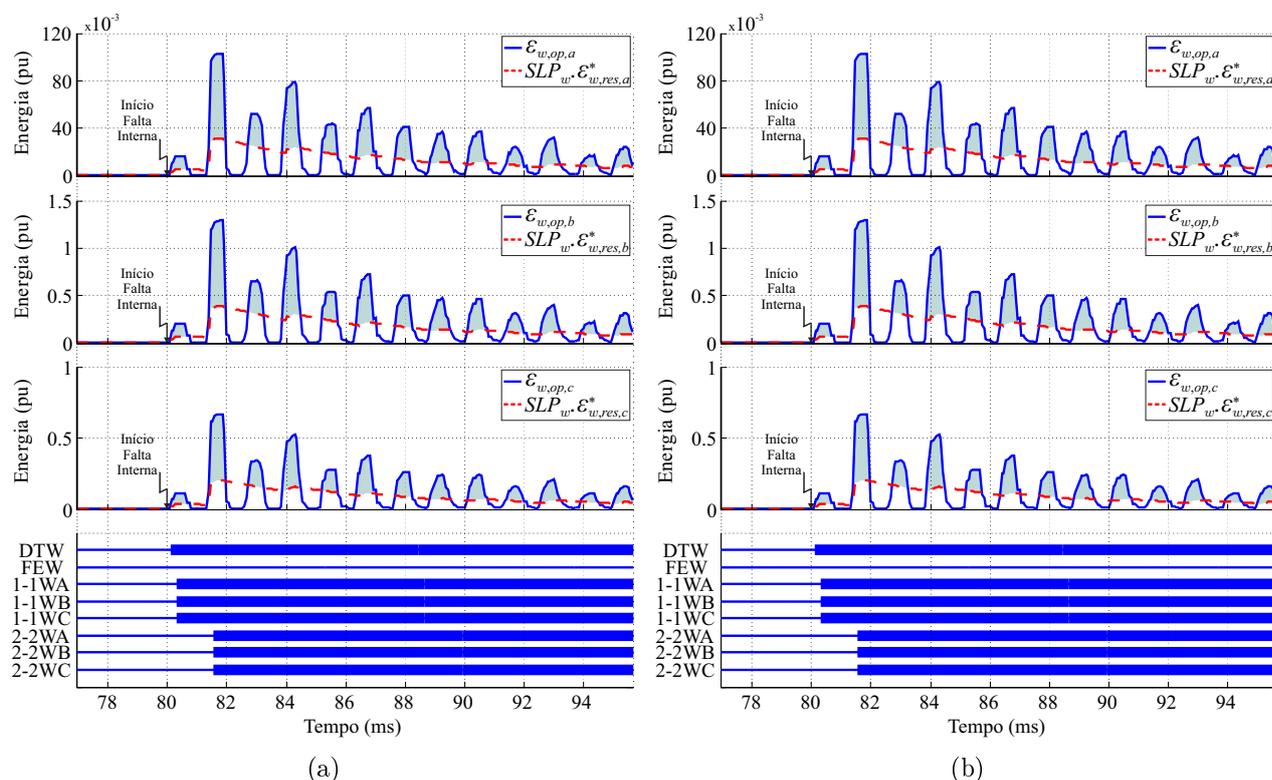


Figura 6.15. Caso 3, Energias dos elementos diferenciais *wavelet* : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2.

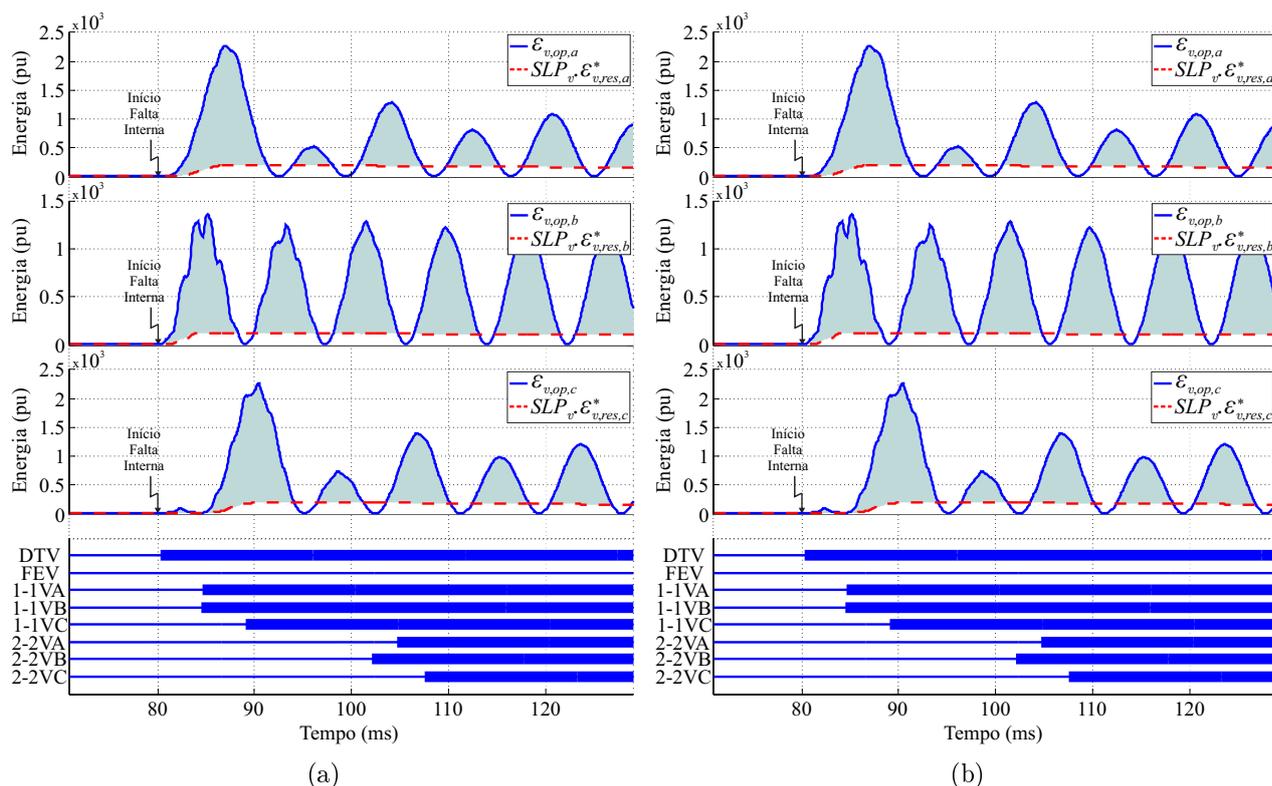


Figura 6.16. Caso 3, Energias dos elementos diferenciais escala : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2.

6.6.5 Caso 4: Curto-Circuito Monofásico Externo Sem Saturação de TC, na LT2, Zona 2

Para este caso, aplica-se uma falta fora da zona de proteção Z_2 em 80 ms, em um ponto imediatamente à frente do TC de proteção de barras TCPBR da LT2. Durante todo o tempo de simulação, os valores de \mathcal{E}_{op} de todas as unidades de fase de ambas as zonas permanecem estáveis, com valores muito pequenos e próximos de zero, diferentemente dos valores de $SLP \cdot \mathcal{E}_{res}^*$, nos quais são verificados incrementos iniciais em seus valores após a incidência da falta, tanto nos elementos diferenciais *wavelet* quanto nos elementos diferenciais escala. Depois disso, $SLP \cdot \mathcal{E}_{res}^*$ mantém um comportamento oscilatório com valores não nulos e apresenta uma alta taxa de variação da energia de restrição $d\mathcal{E}_{res}^*/dt$ durante os primeiros 2 ms, confirmando as condições necessárias para a indicação de uma falta externa sem saturação de TCs para os coeficientes *wavelet*. Portanto, os flags FEW e FEV são ativados 2 ms e 4 ms respectivamente após a incidência da falta nas duas zonas de proteção. A ativação desses flags bloqueia a operação rápida pela lógica 1-de-1 do esquema de proteção por 150 ms, deixando o comando de *trip* a cargo da lógica 2-de-2.

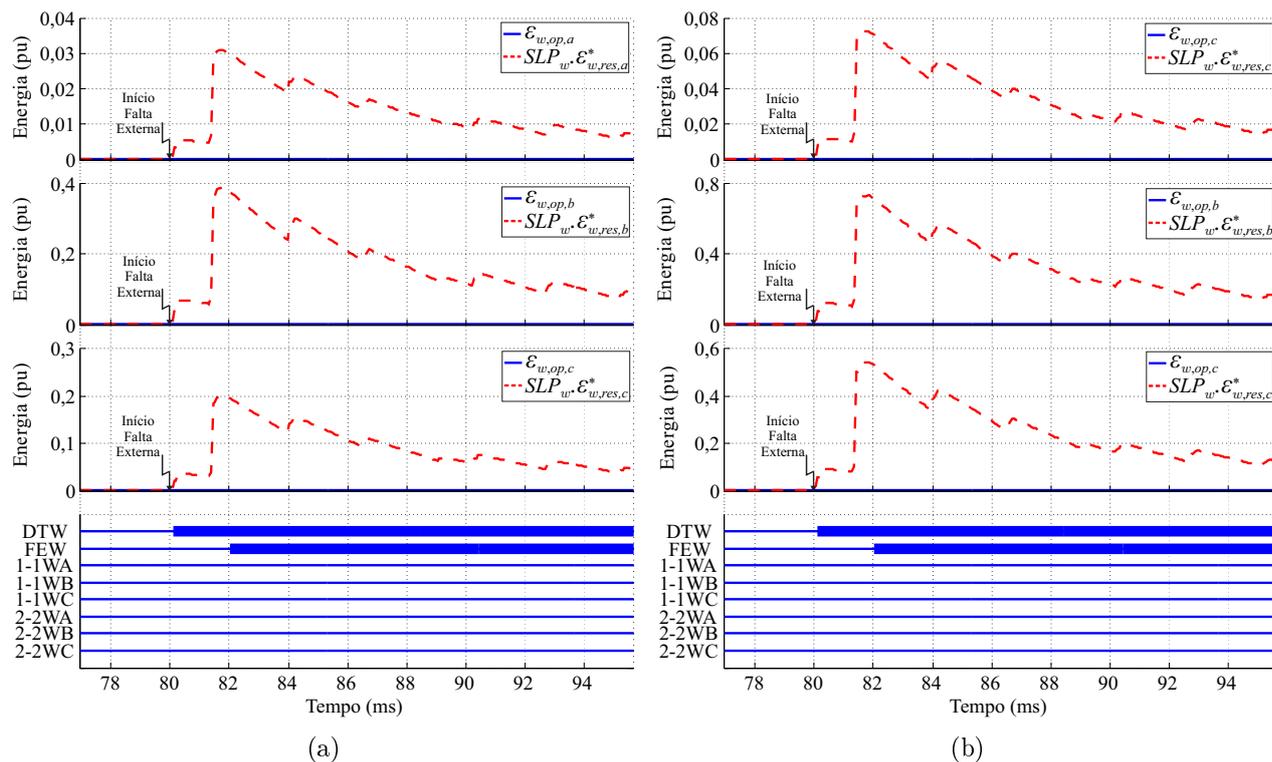


Figura 6.17. Caso 4, energias dos elementos diferenciais *wavelet* : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2.

Comparando a Figura 6.17, identifica-se que apenas os valores das energias de restrição aumentam após a incidência do curto-circuito. Para a zona Z_2 , as energias dos elementos diferenciais *wavelet* são maiores que para a zona Z_1 , situação esta que confirma que os valores das energias dos elementos diferenciais *wavelet* devem ser maiores na zona na qual ocorreu a falta. Por outro lado, as energias dos elementos diferenciais escala para as duas zonas de proteção mantêm valores similares em todas as fases, conforme ilustrado na Figura 6.18. Na situação avaliada, todos os DJs são mantidos operando normalmente, assegurando uma operação contínua do sistema já que não foi enviado comando de *trip* nenhum.

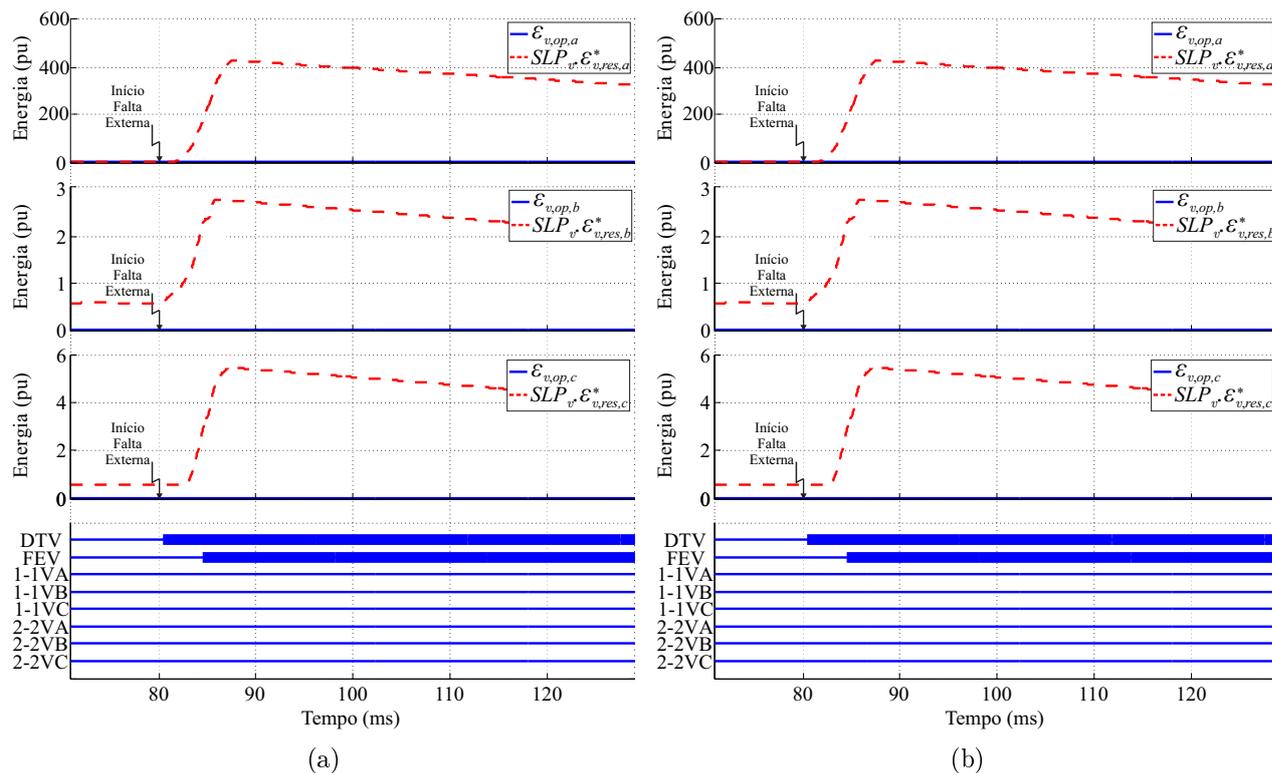


Figura 6.18. Caso 4, energias dos elementos diferenciais escala : (a) Zona 1 ; (b) Zona 2.

6.6.6 Caso 5: Curto-Circuito Monofásico Externo com Saturação de TC, na LT1, Zona 1

Neste caso, aplicou-se uma falta trifásica franca ABCT, externa à zona de proteção do barramento, em 80 ms na linha LT1, perto do transformador de corrente TCPBR. Para simular uma situação de elevada saturação do TCPBR, foi imposta intencionalmente uma impedância de 10Ω no seu enrolamento secundário. Essa condição leva a que ao iniciar a falta unicamente \mathcal{E}_{res}^* aumente seus valores e a energia de operação mantém valores desprezíveis, mas um tempo depois (≈ 4 ms) esta última deve aumentar seus valores satisfazendo as condições de trip do relé. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.19. Para os elementos diferenciais *wavelet* e escala, logo após a incidência da falta, $SLP \cdot \mathcal{E}_{res}^*$ apresenta um aumento em seus valores, ficando \mathcal{E}_{op} com valores desprezíveis. Em seguida, após o tempo de saturação do TC, \mathcal{E}_{op} ultrapassa $SLP \cdot \mathcal{E}_{res}^*$. Neste momento, a falta já foi caracterizada como externa, ativando os *flags* FEW em 2 ms e FEV em 4 ms após a detecção do distúrbio e, conseqüentemente, bloqueando a lógica 1-de-1.

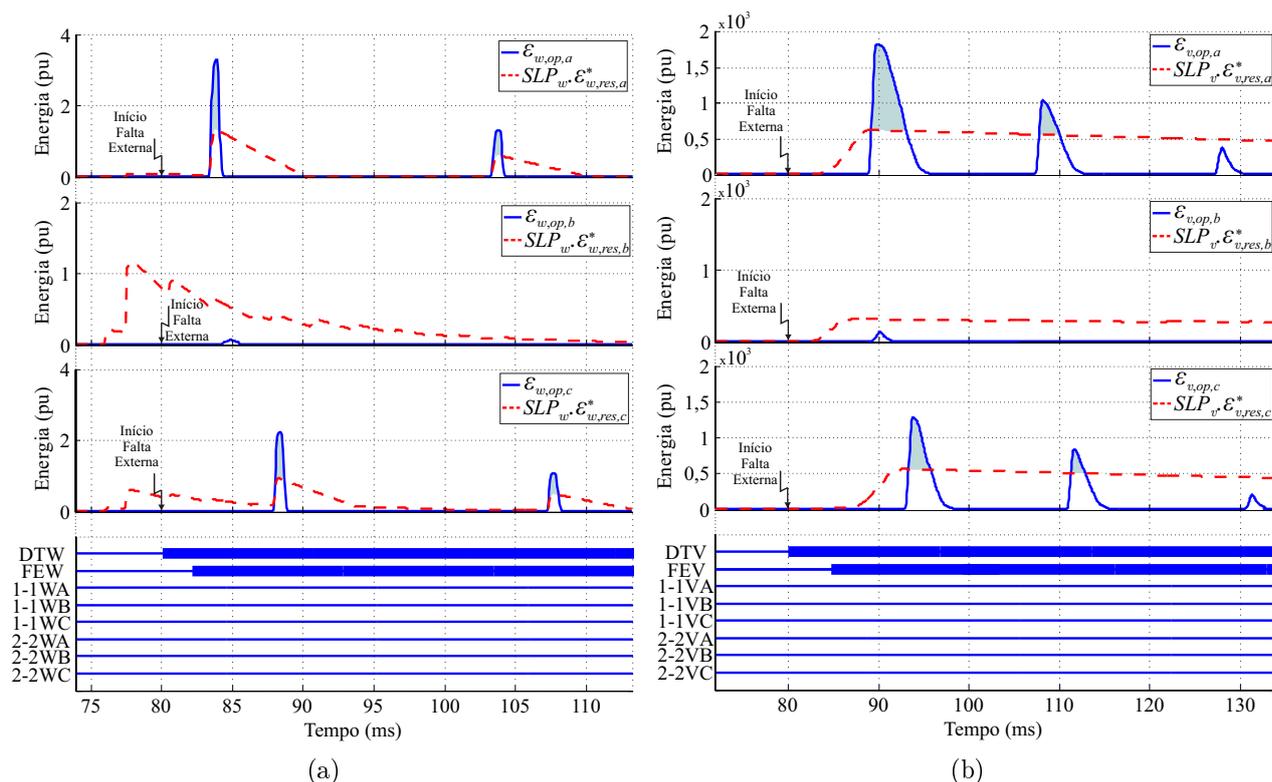


Figura 6.19. Caso 5, energias dos elementos diferenciais da zona 1, : (a) *wavelet* ; (b) Escala.

Uma vez que a lógica 1-de-1 foi bloqueada, a emissão dos sinais de *trip* fica a cargo da lógica 2-de-2. Entretanto, as contagens dessa lógica ficam mais espaçadas devido à saturação do TC, evitando a operação da proteção, conforme ilustrado na Figura 6.19. Portanto, os disjuntores permanecem em operação, sem receber comandos de *trip* durante todo o tempo de simulação.

Aplicou-se uma variação paramétrica nesta condição de operação, a qual consiste em variar o ângulo de incidência da falta externa. Foi simulada a mesma quantidade de casos da análise no caso 1. Como resultado foi obtido que, a saturação externa que gera instantes em que a energia de operação ultrapassa a de restrição suavizada combinada com o ângulo de incidência não afetam o funcionamento do relé diferencial, sempre confirmando que não são alcançadas duas contagens que gerem operação pela lógica 2-de-2, mantendo todas os vãos conectados uma vez que a falta acontece fora da zona de proteção.

6.6.7 Caso 6: Curto-Circuito Evolutivo Externo para Interno

A condição de curto-circuito evolutivo na Z_1 foi simulada da seguinte forma: inicialmente, aplica-se um curto franco AT em 80 ms, externo, nos terminais do TCPBR da LT1, considerando

a saturação do TC conforme simulado no Caso 5. Em um caso prático, ocorreria a ionização do ar nas proximidades do curto externo, o que poderia ocasionar a ruptura da rigidez dielétrica do ar. Dessa forma, o curto-circuito inicialmente externo poderia se deslocar para o interior das zonas protegidas do barramento, caracterizando uma situação de falta evolutiva. Nesse Caso 6, considera-se que a falta é franca e evolui de externa para interna, sendo inicialmente do tipo AT externa e evoluindo em 100 ms para uma falta ABT interna.

Da Figura 6.20, quando ocorre o curto externo, na fase A, $SLP \cdot \mathcal{E}_{res}^*$ permanece com valores baixos. Depois de 2 ms, a detecção da falta externa é indicada com o *flag* FEW e em 4 ms para FEV, bloqueando a lógica 1-de-1. Na sequência, $\mathcal{E}_{op,a}$ ultrapassa $SLP \cdot \mathcal{E}_{res,a}^*$ devido à saturação do TC. Assim, no momento em que o curto interno é estabelecido nas fases A e B, ocorre uma elevação dos valores de operação das referidas fases, a qual é mais evidente na unidade da fase B, onde fortes oscilações ocasionadas pelo transitório de falta interna são registradas. A fase C, não envolvida na falta, só apresenta elevação da energia de restrição e, portanto, não resulta na operação da proteção. Da Figura 6.20, identifica-se também que a fase B não é afetada pela saturação do TC em nenhum momento da simulação, porque essa fase não teve curto externo. Assim, a elevação da $\mathcal{E}_{op,b}$ é identificada somente em 100 ms, quando o curto interno é estabelecido.

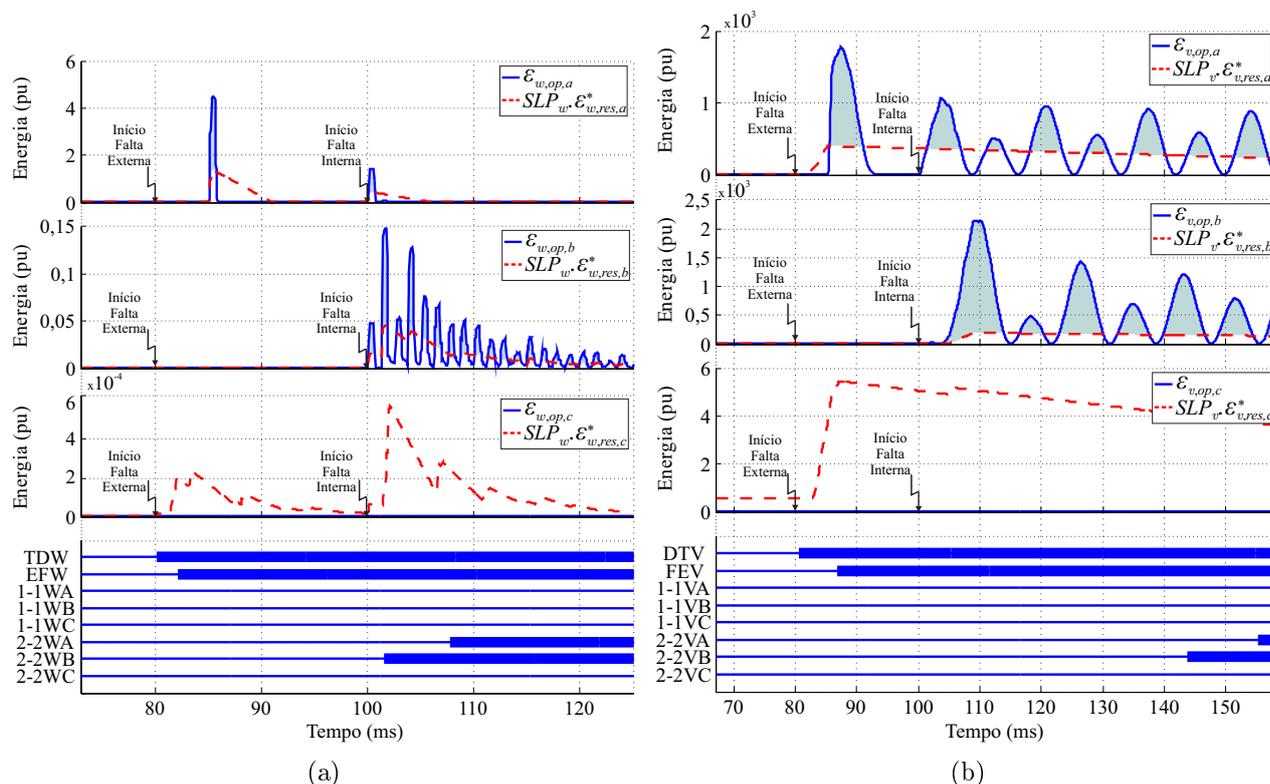


Figura 6.20. Caso 6, energias dos elementos diferenciais da zona 1: (a) wavelet; (b) escala.

Neste caso, o envio de *trip* é gerado pelos elementos diferenciais *wavelet* em 1,52 ms após a incidência do curto interno. Esse *trip* é enviado pela fase B por meio da lógica 2-de-2. Adicionalmente, o *trip* gerado pelos elementos diferenciais escala é emitido em $t_{trip} = 43,76$ ms, sendo também gerado pela fase B, o que garantiria a atuação da proteção no caso de falha na operação baseada nos elementos diferenciais *wavelet*. Destaca-se ainda que a operação da unidade diferencial da fase B ocorre sem atrasos, visto que esta fase não é afetada pelo curto externo. Assim, mais uma vez, os disjuntores que abrem são aqueles associados à Z_1 , de forma que as cargas associadas à Z_2 permanecem operando normalmente.

6.6.8 Avaliação da Variação Paramétrica do Caso 6

A avaliação da variação paramétrica desta condição de operação leva em consideração unicamente a análise da mudança do ângulo de incidência, também analisado no caso 1.

6.6.8.1 Efeito da Variação do Ângulo de Incidência de Falta na Detecção de Falhas Internas no Curto Evolutivo

Um total de 720 simulações são aplicadas durante a variação do ângulo de incidência deste curto evolutivo. O tempo de aplicação da falta externas é mantido fixo, enquanto o ângulo de incidência da falta interna sofre a modificação. Nas Figuras 6.21 e 6.22 apresentam-se os tempos de atuação do esquema de proteção correspondente a cada grau simulado, tanto para coeficientes *wavelet* quanto para coeficientes escala das fases A e B. Esse tempo corresponde à diferença entre o tempo de aplicação do curto interno e o tempo de detecção pela lógica 2-de-2, lembrando que a atuação pela lógica 1-de-1 foi bloqueada uma vez que a falta externa foi detectada. A detecção pela fase A sofre alguns atrasos importantes que foram evidenciados no caso pontual, onde a fase envolvida no curto externo e que depois evolui para interno, apresenta amortecimento dos transitórios, portanto, a detecção da falta com a lógica 2-de-2 fica comprometida. Neste caso, detectou-se uma atuação mais rápida por parte da fase não envolvida no curto externo, onde o tempo de envio de *trip* ao relé está perto de 1,5 ms após a falta interna começar para os elementos diferenciais *wavelet*. De outro lado, a operação pelos elementos diferenciais escala também são alcançados para todas as variações de ângulo

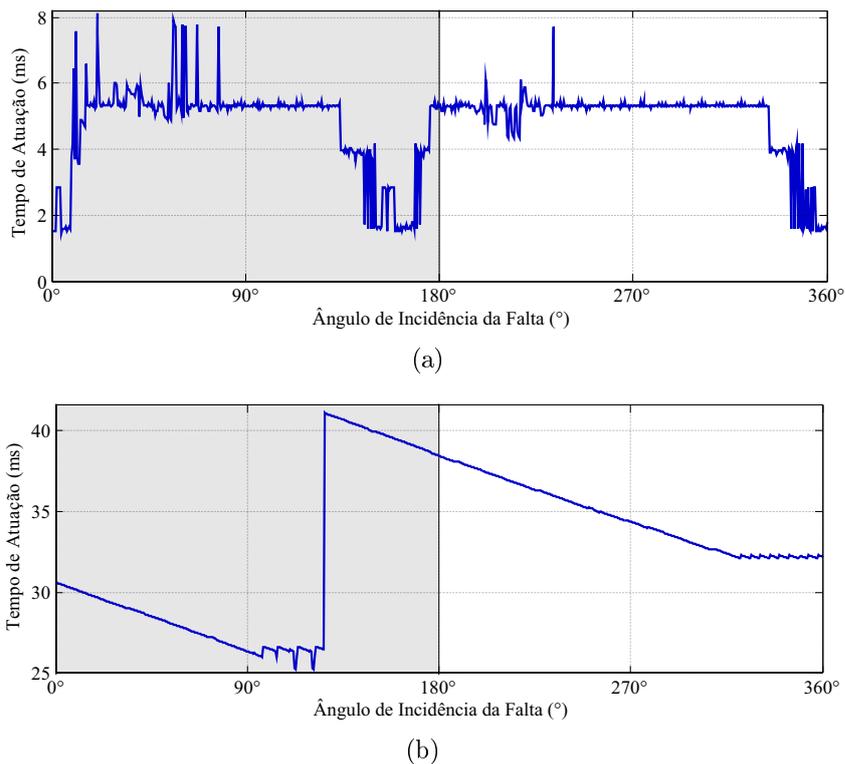


Figura 6.21. Tempo de atuação durante a análise de sensibilidade paramétrica do caso 6, variação do ângulo de incidência da falta na fase A : (a) 2-de-2 w ; (b) 2-de-2 v .

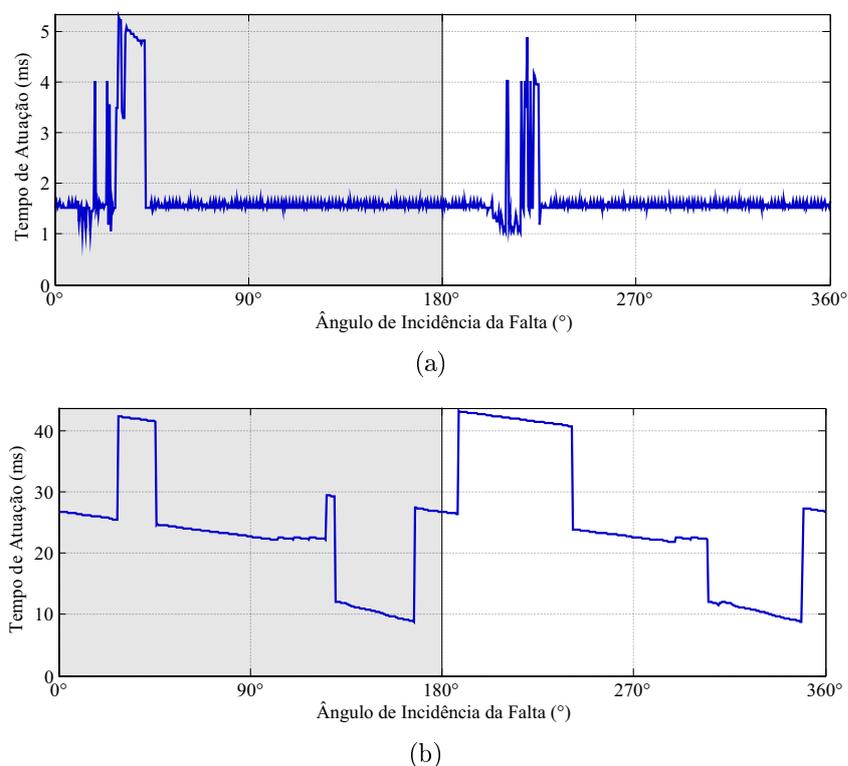


Figura 6.22. Tempo de atuação durante a análise de sensibilidade paramétrica do caso 6, variação do ângulo de incidência da falta interna na fase B : (a) 2-de-2 w ; (b) 2-de-2 v .

de incidência, mas notando variabilidade nos tempos de detecção que não afetam o sistema, em virtude de operar diretamente pelos elementos diferenciais *wavelet*.

Nas Figuras 6.23 e 6.24 são apresentados os histogramas de frequência relativa associados aos tempos de operação pela lógica 2-de-2. A fase não envolvida no curto externo apresenta operações mais rápidas. Levando em consideração os elementos diferenciais *wavelet*, um 57% das atuações são alcançadas pela unidade diferencial da fase B entre um tempo de 1,05 ms e 1,58 ms e um 37,4% acontecem em máximo 2,11 ms. Já para a fase A, um 66% de atuações da proteção por meio essa fase são alcançadas em torno de 5 ms, mostrando que essa fase sofre atrasos quando é comparada com a fase B.

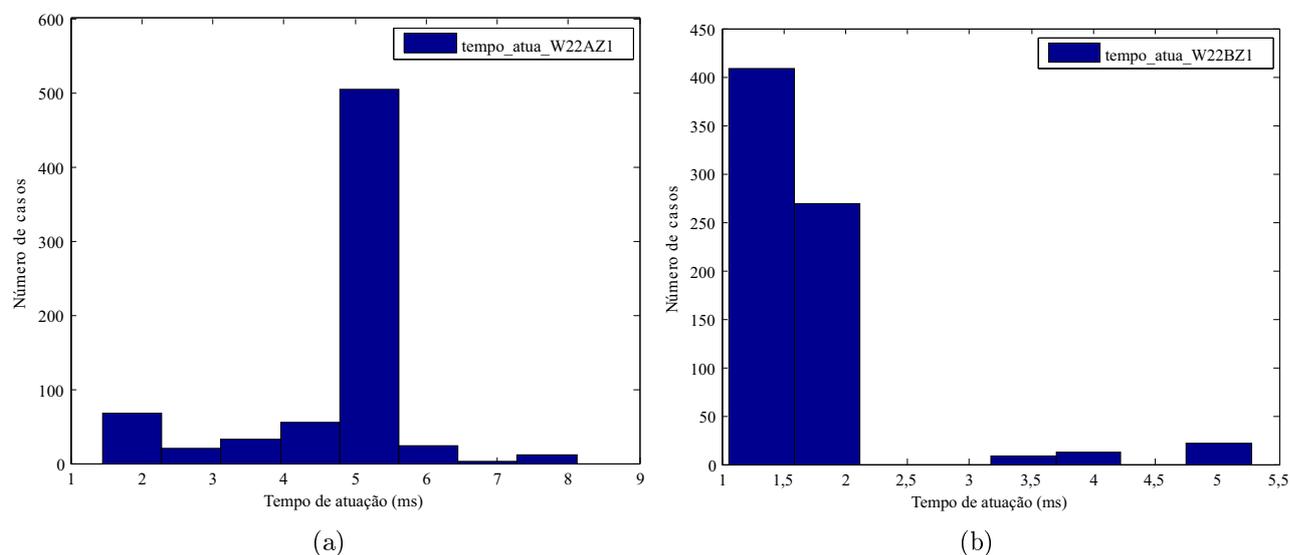


Figura 6.23. Histograma de frequência relativa do tempo de atuação pela lógica 2-de-2, coeficientes *wavelet*, para variações de ângulo de incidência durante um curto evolutivo: (a) Fase A; (b) Fase B.

Os tempos de atuação para os coeficientes escala e pela lógica 2-de-2 acontecem mais vezes em um intervalo de tempo entre 31,5 ms e 33,1 ms, apresentando também seu menor tempo de envio de *trip* em 26,8 ms com a fase A. Já para a fase B, o 42,78% das atuações acontecem no máximo em 26,1 ms, confirmando que a operação pela fase B é mais rápida. Destaca-se desta análise que o desempenho do relé diferencial 87BW oferece segurança durante esta condição de operação que é poucas vezes mencionadas em análise de proteção de barramentos.

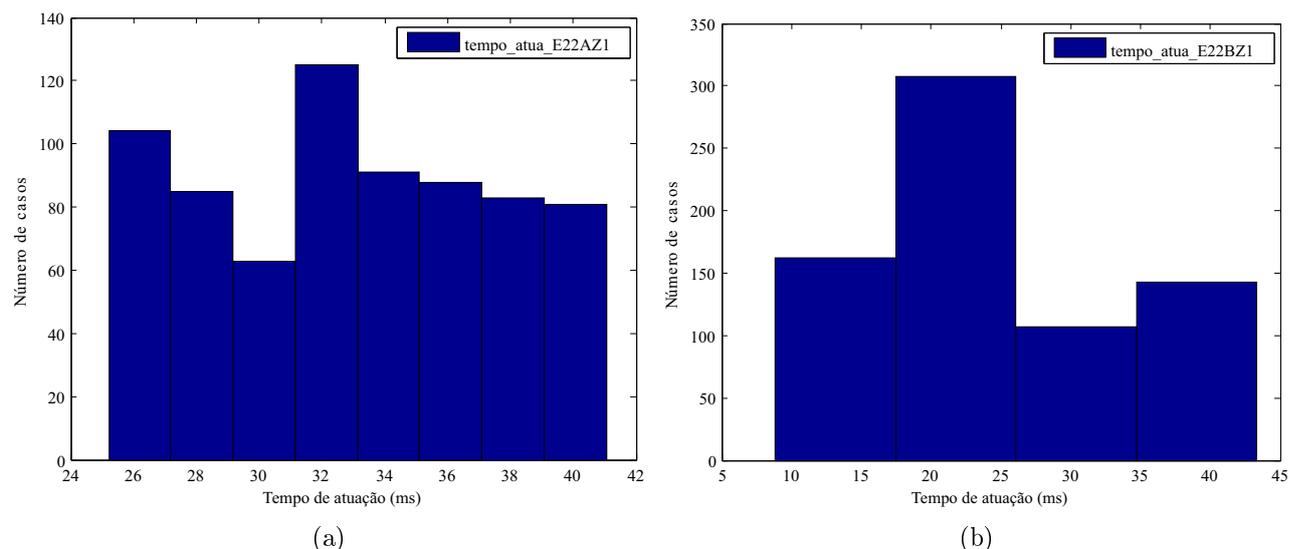


Figura 6.24. Histograma de frequência relativa do tempo de atuação pela lógica 2-de-2, coeficientes escala, para variações de ângulo de incidência durante um curto evolutivo: (a) Fase A; (b) Fase A.

Uma vez mais o esquema apresenta um ótimo desempenho, operando em um 100% dos casos pela fase mais rápida e, por meio dos coeficientes *wavelet*. Os coeficientes escala também oferecem segurança na detecção de faltas, mantem-se operando de forma paralela às unidades diferenciais *wavelet*.

6.6.9 Caso 7: Curto-Circuito Monofásico Interno na B_1 , Zona 1, com Proteção Transferida

A configuração de subestação avaliada neste trabalho permite executar a transferência da proteção de qualquer carga para outro barramento com o propósito de realizar manutenção do DJ associado, mantendo energizado o vão correspondente (VIANNA, 2013; IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009). Todos os vãos da subestação são remanejados para um dos barramentos por meio das suas chaves seletoras de barramento, exceto o vão no qual será realizada a manutenção. Neste caso, o vão sob manutenção fica ligado no outro barramento e sua proteção quando sensibilizada passa a ser associada ao disjuntor de interligação DJIB.

Para essa análise, avalia-se a transferência da proteção do DJLT3 da Figura 6.25 com o objetivo de liberá-lo para manutenção. Para isso, é necessário conectar todos os vãos do barramento 1 que não se encontram em manutenção no barramento 2, o qual, nesse caso, é assumido como o barramento principal. Assim, apenas o vão da LT3 fica conectado no barramento 1, o

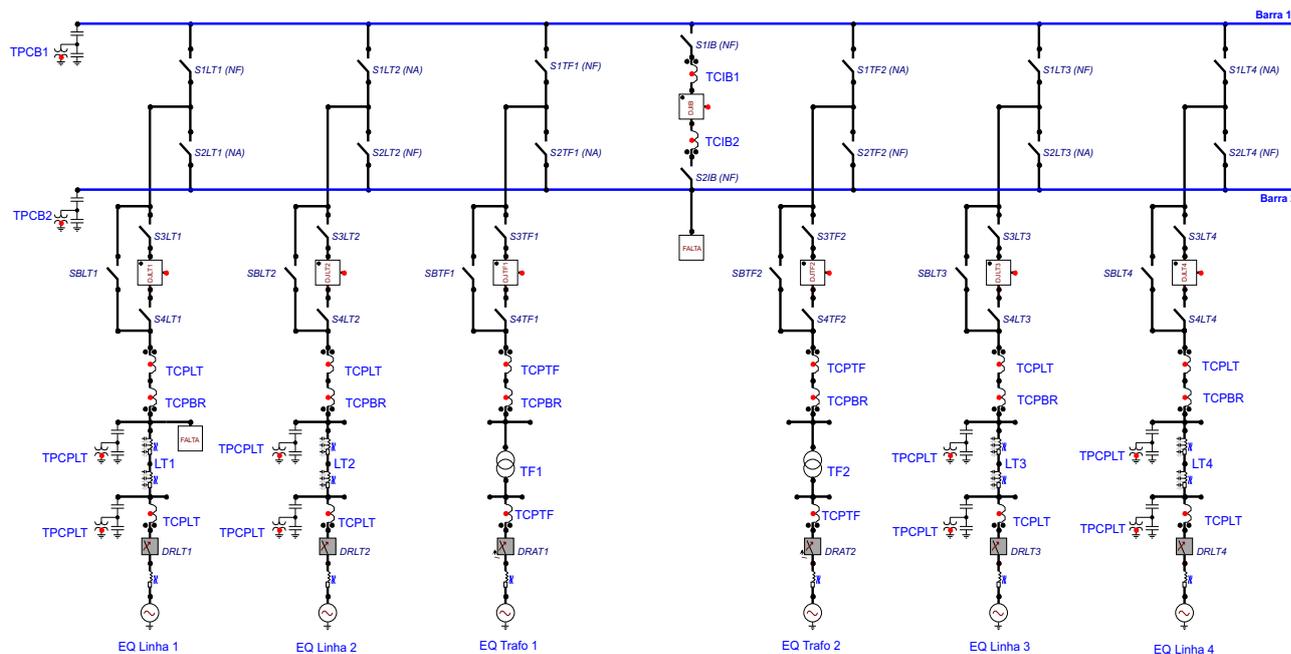


Figura 6.25. Diagrama unifilar da configuração barra dupla com saída com disjuntor simples a 5 chaves, proteção transferida do DJLT3 por DJIB.

qual é assumido como barramento de transferência.

Para manter o vão energizado durante a retirada do disjuntor DJLT3, a chave seccionadora de *by-pass* SBLT3 é fechada, o seu respectivo DJ é aberto e, em seguida, as suas chaves seccionadoras associadas são abertas. Dessa forma, o DJIB fica em série com o vão da LT3 por meio de B_1 . Assim, se uma falta acontece no barramento 1, a proteção detecta essa anormalidade abrindo tanto DJIB quanto o DJ do terminal remoto por meio de um comando de transferência de disparo direto TDD.

Conforme mencionado no Caso 2, durante a transferência de vãos de um barramento para o outro, ambas as barras permanecem conectadas em paralelo por um dado período de tempo. Portanto, se uma falta ocorrer enquanto essa condição existir, seria gerado um *trip* geral de toda a subestação, conforme foi descrito na análise do Caso 2.

Para simular uma condição completa de falta quando a proteção da LT3 foi transferida para o DJIB, realizou-se o seguinte procedimento. Nota-se da Figura 6.26(a) que até aproximadamente 60 ms, pelo DJIB, flui a corrente de operação normal do sistema, a qual equivale às correntes entre B_1 e B_2 , uma vez que as cargas estão equilibradas entre as duas barras. Em 60 ms todas as outras cargas são transferidas ao B_2 , portanto, apenas a corrente do vão em manutenção circula através do DJIB. Assim, uma vez que a falta AT franca é aplicada em 130 ms, no barramento B_1 ,

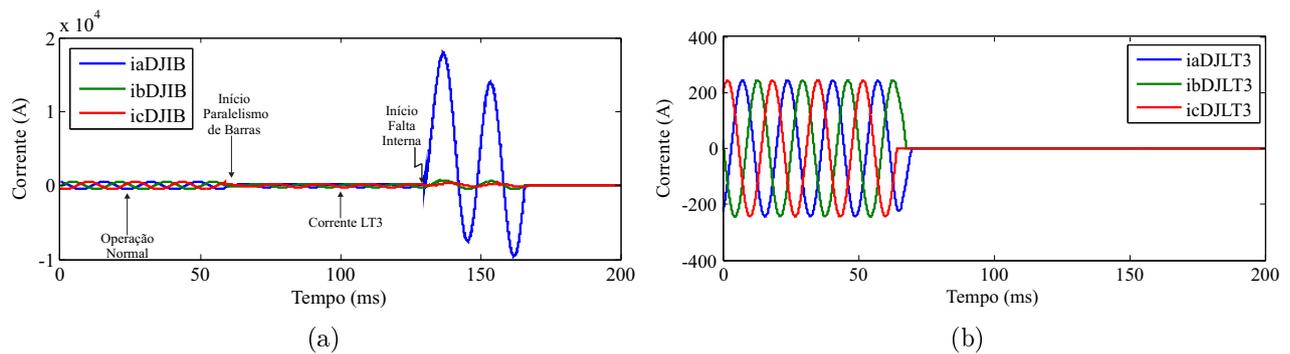


Figura 6.26. Caso 7, Corrente pelos disjuntores : (a) DJIB ; (b) DJLT3.

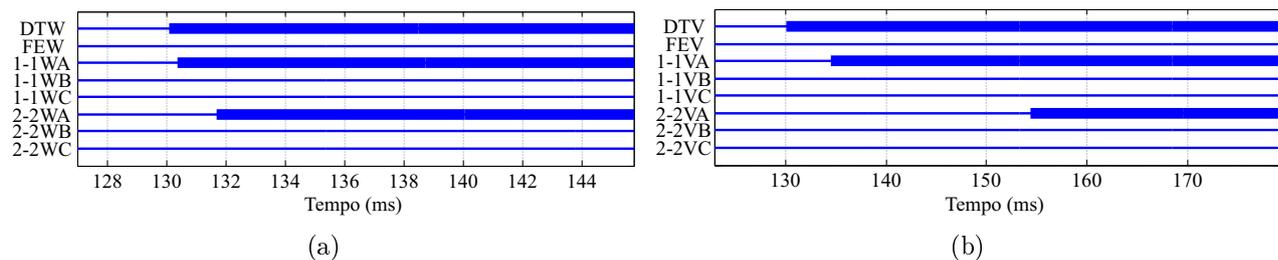


Figura 6.27. Caso 7, Curto-Circuito interno proteção transferida, elementos diferenciais: (a) Wavelet ; (b) Escala.

a corrente da fase com falta eleva seus valores, apresentando também influência da componente DC de decaimento exponencial. Na Figura 6.26(b) apresenta-se a corrente fluindo pelo DJLT3 durante todo o tempo de simulação. Uma vez que esse elemento é retirado para manutenção, as correntes se aproximam de zero quando os seus contatos são abertos totalmente.

Em relação à operação da proteção com os elementos diferenciais *wavelet* e escala, ocorre um comportamento similar ao verificado no Caso 1, no qual a falta é detectada como pela unidade diferencial da fase A, ativando a lógica de atuação 1-de-1, em 0,33 ms após a ocorrência da falta com os elementos diferenciais *wavelet* e 4,35 ms por meio dos elementos diferenciais escala, conforme apresentado na Figura 6.27. Apenas é desligado o disjuntor de interligação de barras e mantendo a operação das cargas no barramento 2 estáveis.

6.7 COMPARAÇÃO PROTEÇÕES 87B E 87BW

Esta seção limita-se a realizar uma comparação do método proposto com a proteção tradicional baseada em correntes. Os dois esquemas trabalham com elementos instantâneos analisando os sinais de corrente (87B) e energia (87BW) no domínio do tempo.

A comparação dos dois esquemas será feito por meio de simulação de casos pontuais, uma

de curto interno e a outra para curto evolutivo. Assim, a primeira condição corresponde a uma falta interna AT franca no B_1 em 82 ms. Como é mostrado na Figura 6.28, ambos os esquemas de proteção operam de forma satisfatória, detectando a falta pela lógica 1-de-1 em 0,3 ms após a ocorrência com o relé 87BW. De outro lado, a proteção tradicional 87B envia comando de *trip* 4,13 ms após a falta ter iniciado. Destaca-se então, a vantagem de implementação de um esquema com a transformada *wavelet* para diminuir de forma considerável os tempos de atuação, principalmente para curtos internos à zona protegida. Os elementos diferenciais escala podem enviar comando de *trip* 4,33 ms após a falta acontecer, dado o caso que os elementos *wavelet* não operem. Assim, a subestação garante sua proteção, seja por elementos *wavelet* ou escala em tempos rápidos.

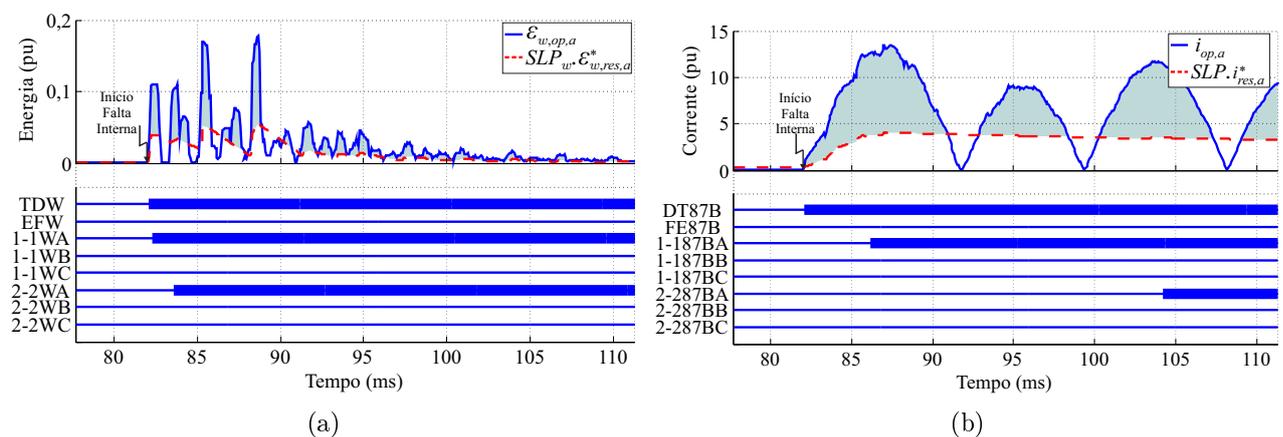


Figura 6.28. Comparação esquemas de proteção durante um curto interno : (a) 87BW ; (b) 87B.

O segundo caso analisado corresponde a um curto evolutivo. Na Figura 6.29 são apresentadas as formas de onda para ambos os esquema de proteção quando um curto evolutivo afeta o sistema. O curto-circuito externo foi aplicado em 70 ms na LT3 e posteriormente um curto interno acontece na barra 1 . A operação da proteção 87BW é dada 4,25 ms após o início da falta interna, pela lógica 2-de-2, notando que, os transitórios são amortecidos pela falta externa e por isso o comando de *trip* leva um atraso, mas mesmo com esse atraso o *trip* ocorre em um tempo muito pequeno. Já a operação da proteção 87B é alcançada em quase 30 ms após a ocorrência da falta externa. Para qualquer esquema de proteção, a operação rápida pela lógica 1-de-1 foi inibida uma vez que a falta externa aconteceu.

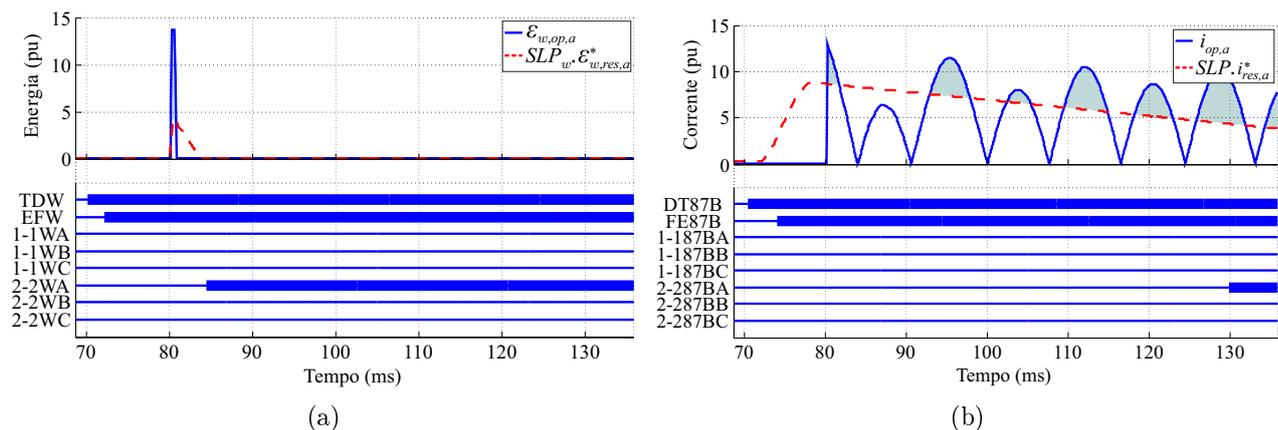


Figura 6.29. Comparação esquemas de proteção durante um curto evolutivo: (a) 87BW ; (b) 87B.

Comparando os dois esquemas de proteção de barramento com elementos instantâneos, nota-se que, a implementação com a transformada *wavelet* é segura e confiável, obtendo tempos de *trip* menores a 1 ms para curtos internos. De outro lado, os atrasos na detecção de condições de faltas evolutivas são muito pequenos comparados com a proteção tradicional baseada em correntes.

6.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as análises e resultados da operação do esquema de proteção diferencial de barramentos de baixa impedância proposto. Foram avaliadas diversas condições de operação típicas em subestações de potência, além da definição de taxa de amostragem e da *wavelet* mãe a serem usadas no algoritmo. Dos resultados obtidos nas simulações que levam em consideração a variação paramétrica das características do curto, verificou-se a vantagem de trabalhar com a TWDR baseada na db4, visto que resultou em operações mais rápidas do esquema. As outras famílias *wavelet* resultam atrasos adicionais na atuação da proteção, pois possuem um maior número de coeficientes ou não possuem uma resposta em frequência adequada para a aplicação. Para simulações de condições de faltas que envolvem saturação de TC, a proteção não foi afetada, evitando falsas operações. A mesma segurança foi verificada também para situações de curtos evolutivos, bem como em cenários de transferência da proteção quando disjuntores são retirados para manutenção.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação foi apresentado um algoritmo de proteção diferencial de barramentos que é resultado da representação no domínio *wavelet* dos conceitos fundamentais da proteção diferencial de baixa impedância. Como resultado, o algoritmo proposto é capaz de promover *trips* extremamente rápidos e confiáveis para curtos-circuitos internos e segurança para curtos-circuitos externos, mesmo aqueles com severa saturação de TCs. Além disso, com o emprego de lógicas de seleção de zonas, o algoritmo proposto pode ser facilmente aplicado às mais diversas configurações de barramento, inclusive aquelas que possuem uma topologia completamente variável, o que lhe confere viabilidade prática de utilização em aplicações reais de proteção de barramentos de SEs.

Os resultados obtidos indicam que para curtos-circuitos internos, o elemento diferencial *wavelet* poderá atuar pela lógica 1-de-1 proposta com tempos de menos que 1 milissegundo. Por outro lado, no caso de faltas externas, devido ao emprego do modo de operação segura, a lógica 1-de-1 proposta é bloqueada por um intervalo de tempo de 150 ms, de modo que caso haja a evolução do curto-circuito de externo para interno, o *trip* seria dado pela lógica 2-de-2 proposta. Mesmo assim, ressalta-se que, por se tratar de barramento, os transitórios são severos e pouco amortecidos, garantindo também atuações rápidas com a lógica 2-de-2. Além disso, esse esquema também garante a segurança para curtos-circuitos com severa saturação dos TCs, haja visto que os pulsos na energia de operação *wavelet* seriam espaçados de um intervalo de tempo suficiente para não satisfazer a lógica 2-de-2. Foi usada a variação paramétrica para a análise de casos típicos de faltas em barramentos. A ideia principal foi verificar se o desempenho da proteção não era influenciado por mudanças como instante de aplicação da falta e sua resistência. Em todos os casos a proteção atuou de forma positiva, até nos casos mais extremos onde os transitórios seriam muito amortecidos, mas por ser aplicados em barramentos, esses amortecimentos não afetam o esquema 87BW. O uso em paralelo dos

coeficientes escala garantem confiabilidade e tornam a implementação mais robusta, sempre operando como proteção de retaguarda aos coeficientes *wavelet* do esquema implementado e testado em condições de operação pouco abordadas na literatura técnica de proteção diferencial.

A *wavelet* mãe selecionada foi da família Daubechies, de quatro coeficientes, a qual apresentou um ótimo desempenho devido a que toda a formulação foi aplicável na operação em tempo real. Assim, essa seleção oferece baixo esforço computacional sem ser muito influenciada pela variação das taxas de amostragem, situação que tornaria viável o uso em relés de taxas de amostragem maiores aos usados atualmente.

Além foi feita uma comparação direta do esquema 87B e 87BW proposto. Dessa forma, dois casos críticos de simulação foram definidos, mostrando como o esquema 87BW reduz os tempos de atuação de forma considerável, já que esse esquema representa muito bem os transitórios e as altas frequências, levando a melhorar a operação da proteção, sendo então uma alternativa segura e confiável para ser usada em relés comerciais devido a sua aplicabilidade em tempo real.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como continuação aos temas estudados nesta pesquisa, as seguintes propostas são consideradas:

- Realizar uma análise comparativa com outras técnicas baseadas no domínio do tempo.
- Implementação do algoritmo proposto em *hardware*, a fim de realizar testes comparativos com relés reais.
- Aplicar os elementos diferenciais *wavelet* e escala propostos a outros componentes do sistema de potência, como linhas de transmissão e transformadores de potência.
- Implementação das lógicas de proteção desenvolvidas usando outras técnicas de filtragem, diferentes da TWDR, que possam ser implementadas em tempo real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. *Protection Application Handbook*. [S.l.]: Book N° 6, BA THS / BU Transmission Systems and Substations LEC Support Programme, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 7.
- ALSTOM GRID. *Network Protection and Automation Guide*. 2nd edition. ed. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 2.
- ALTUVE, H. J.; SCHWEITZER, E. O. *Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems*. Pullman, USA: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2010. Citado 3 vezes nas páginas 3, 36, and 47.
- ALVARENGA, M. T. S. *Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Alta Impedância de Barramentos no Software ATP*. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, Dez. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 39 and 44.
- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 1999. Citado na página 7.
- BEHRENDT, K.; COSTELLO, D.; ZOCHOLL, S. E. *Considerations for Using High-Impedance or Low-Impedance Relays for Bus Differential Protection*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, Washington USA, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 9.
- CASTRO, R.; DÍAZ, H. An overview of wavelet transforms application in power system. In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE (PSCC). Sevilla, SP: IEEE, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 36 and 40.
- COSTA, F. B. *Uma Técnica de Diagnóstico em Tempo Real de Distúrbios Transitórios Baseada na Transformada Wavelet para uso em Registradores Digitais de Perturbação*. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, jul. 2010. Citado 2 vezes nas páginas 34 and 49.
- COSTA, F. B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, p. 140–153, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 26, 65, and 69.
- COSTA, F. B.; 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, Jan 2013. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas páginas 48, 51, and 66.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Real-time detection of fault-induced transients in transmission lines. *Electronics Letters*, v. 46, n. 11, p. 753–755, May 2010. ISSN 0013-5194. Citado na página 48.
- DAUBECHIES, I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, USA: CBMS-NSF Regional Conference Series, SIAM, 1992. Citado na página 26.

- EISSA, M. A novel wavelet approach to busbar protection during {CT} saturation and ratio-mismatch. *Electric Power Systems Research*, v. 72, n. 1, p. 41 – 48, 2004. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779604000823>>. Citado 3 vezes nas páginas 1, 40, and 44.
- EISSA, M. M. Improvement of the differential busbar characteristic to avoid false operation during to ct saturation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 6, n. 10, p. 931–939, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43, and 44.
- EISSA, M. M. A new digital busbar protection technique based on frequency information during ct saturation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 45, p. 42–49, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 43 and 44.
- EISSA, M. M. New differential busbar characteristic based on high frequencies extracted from faulted signal during current transformer saturation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 8, p. 619–628, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 43 and 44.
- FUNK, H.; ZIEGLER, G. Numerical busbar protection, design and service experience. In: *Developments in Power System Protection, Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 434)*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 131–134. ISSN 0537-9989. Citado na página 11.
- GROSSMAN, A.; MORLET, J. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Mathematical Analysis*, p. 155–166, 1984. Citado na página 26.
- GUZMÁN, A.; QIN, B.-L.; LABUSCHAGNE, C. *Reliable Busbar and Breaker Failure Protection with Advance Zone Selection*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, Washington USA, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 17, 22, and 47.
- GUZMÁN, A.; QIN, B.-L.; LABUSCHAGNE, C. Reliable busbar protection with advanced zone selection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 625–629, Apr. 2005. Citado 5 vezes nas páginas 22, 36, 37, 44, and 47.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. [S.l.], 2004. Citado na página 62.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *IEEE Std C37.234 - Guide for Protective Relay Applications to Power System Buses*. [S.l.], 2009. Citado 4 vezes nas páginas 14, 16, 19, and 87.
- JIANG, F.; BO, Z. Q.; REDFERN, M. A.; WELLER, G.; CHEN, Z.; XINZHOU, D. Application of wavelet transform in transient protection-case study: busbar protection. In: *Developments in Power System Protection, 2001, Seventh International Conference on (IEE)*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 197–200. ISSN 0537-9989. Citado na página 36.
- KUMAR, A.; HANSEN, P. Digital bus-zone protection. *Computer Applications in Power, IEEE*, v. 6, n. 4, p. 29–34, Oct 1993. ISSN 0895-0156. Citado 4 vezes nas páginas 10, 11, 13, and 53.
- LOPES, F.; FERNANDES, D.; NEVES, W. A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 28, n. 3, p. 1626–1634, July 2013. ISSN 0885-8977. Citado na página 53.

- MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 11, n. 7, Jul 1989. Citado na página 26.
- MARQUES, J. P.; OLIVEIRA, A.; CARDOSO, G. Algorithm using discrete wavelet transform to power transformers protection. In: *Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities'*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5. Citado na página 40.
- MEDEIROS, R.; COSTA, F.; SILVA, K. Power transformer differential protection using the boundary discrete wavelet transform. *IEEE Transactions on Power Delivery*, PP, n. 99, p. 1–1, 2016. ISSN 0885-8977. Citado na página 40.
- MEDEIROS, R. P. *Proteção Diferencial de Transformadores de Potência Utilizando a Transformada Wavelet*. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFRN: Universidade Federal de do Rio Grande do Norte, Natal, RN, May. 2014. Citado na página 40.
- MOHAMMED, M. High-speed differential busbar protection using wavelet-packet transform. *IEE Proceedings in Generation, Transmission & Distribution*, v. 152, n. 6, p. 927–933, Nov. 2005. Citado 4 vezes nas páginas 1, 41, 42, and 44.
- MOLAS, E. C.; MORAIS, L. P.; SILVA, K. M. Análise das trajetórias no plano alfa referentes à operação da proteção diferencial de linhas de transmissão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (XXII SNPTEE). Brasília, DF, 2013. Nenhuma citação no texto.
- OLIVEIRA, M. O.; BRETAS, A. S. Application of discrete wavelet transform for differential protection of power transformers. In: *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–8. Citado na página 40.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações*. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>. Citado na página 2.
- PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. T. *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. New York: Cambridge University Press., 2000. Citado 5 vezes nas páginas 26, 27, 28, 32, and 34.
- PEREIRA, P.; SILVA, G.; MOREIRA, C.; PEREIRA, P. S.; ESPINHA, G. Requisitos, dificuldades e novas soluções para os testes de proteções diferenciais de barra. In: XII SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE (STPC). Rio de Janeiro, Brasil, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 3.
- PERERA, N.; RAJAPAKSE, A.; MUTHUMUNI, D. Wavelet based transient directional method for busbar protection. In: *International conference on power systems transients*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado 2 vezes nas páginas 42 and 44.
- QIN, B.-L.; GUZMAN-CASILLAS, A.; SCHWEITZER, E. O. A new method for protection zone selection in microprocessor-based bus relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 3, p. 876–887, Jul 2000. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 37 and 44.
- RAMAR, K.; NGU, E. E.; ISHAK, N. A simple numerical busbar protection technique using instantaneous current values. In: *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–4. ISSN 2157-4839. Citado 2 vezes nas páginas 37 and 44.

- SIEMENS. *Manual Protección diferencial de barras descentralizada y fallo del interruptor. SIPROTEC. 7SS522 V4.6, 7SS523 V3.2, 7SS525 V3.2.* [S.l.], 2006. Citado na página 53.
- SILVA, K. M. e. *Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão.* 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, abr. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 27 and 32.
- STEENKAMP, L.; LABUSCHAGNE, C.; STOKES-WALLER, E. *Tutorial: Complex Busbar Protection Application.* Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, 2007. Citado na página 22.
- VALSAN, S. P.; SWARUP, K. S. Computationally coefficient wavelet-transform-based digital directional protection for busbars. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 3, p. 1342–1350, Jul. 2007. Citado 3 vezes nas páginas 40, 41, and 44.
- VIANNA, P. de L. *Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Baixa Impedância de Barramentos no Software ATP.* 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, Dez. 2013. Citado 6 vezes nas páginas 2, 15, 37, 38, 44, and 87.
- VÁSQUEZ, F. A. M.; ESCUDERO, A. P.; BAINY, R. G.; SILVA, K. M. e. Fundamentals of instantaneous-values-based busbar differential protection. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE.* [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 13.
- WANG, S.; DONG, X.; SHI, S. A novel busbar protection scheme based on wavelet multi-resolution signal decomposition. In: *Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change, 10th IET International Conference on.* [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 41 and 44.
- ZIEGLER, G. *Numerical Differential Protection: Principles and Applications.* 2. ed. Berlin, Germany: Siemens, 2012. Citado 6 vezes nas páginas iv, 8, 10, 11, 12, and 58.
- ZOU, G.; GAO, H. A traveling-wave-based amplitude integral busbar protection technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 2, p. 602–609, April 2012. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 39 and 44.