

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO PARA
IDENTIFICAÇÃO DE FALTAS DE
ALTA IMPEDÂNCIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Patrick Escalante Farias

Santa Maria, RS, Brasil

2013

DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Patrick Escalante Farias

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, **Área de Concentração em Processamento de Energia**, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS), como requisito parcial a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**

**Orientador: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.
Coorientador: Adriano Peres de Moraes**

Santa Maria, RS, Brasil

2013

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE FALTAS DE ALTA
IMPEDÂNCIA**

elaborada por

Patrick Escalante Farias

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Adriano Peres de Moraes, Dr. Eng. (UFSM)
(Coorientador)

Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. Eng. (UFSM)

Manoel Firmino de Medeiros Junior, Dr. Eng. (UFRN)

Santa Maria, 08 de Março de 2013.

Escalante Farias, Patrick
Detecção e Classificação de Transitórios em Redes de
Distribuição para Identificação de Faltas de Alta
Impedância / Patrick Escalante Farias.-2013.
131 p.; 30cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior
Coorientador: Adriano Peres de Moraes
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2013

1. Faltas de alta impedância 2. Detecção 3.
Classificação 4. Transitórios 5. Redes de distribuição I.
Cardoso Junior, Ghendy II. Peres de Moraes, Adriano
III. Título.

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Patrick Escalante Farias. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor. Endereço: Rua Lupicínio Rodrigues, 125, Bairro Parque Pinhal, Itaara, RS, CEP: 97185-000.

Fone: (0xx) 55 3227-1220; End. Eletr.: pefarias@gmail.com

Dedico este trabalho a meus pais Antônio e Ivete, a minha irmã Sayonara, aos meus avós Aldo, Suely, Feliciano e Zila e a minha noiva Paula pelo amor e constante apoio em meus estudos e por sempre acreditarem em meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a meus pais, Antônio e Ivete, por nunca terem desistido de meus estudos e pelo seu enorme esforço em me fornecer as melhores condições de ensino e também de estrutura familiar. Agradeço também a minha irmã, Sayonara, que sempre me apoiou e se mostrou orgulhosa de minhas conquistas tornando-as ainda mais valiosas.

Agradeço ao apoio e paciência de minha noiva Paula, que sempre esteve ao meu lado, principalmente nos momentos finais e estressantes desse trabalho.

Ao meu orientador, professor Ghendy, por me apoiar e acreditar que eu seria capaz de realizar este trabalho sobre um assunto bastante desafiador. Ao amigo e coorientador, professor Adriano, pelas valiosas dicas e observações sobre a elaboração e defesa desse trabalho.

Aos amigos e ex-colegas de trabalho da empresa Certel Energia, que ajudaram na minha formação e conseqüentemente na elaboração desse trabalho. Especial agradecimento ao ex-colega Samuel que não negou ajuda em nenhum momento e sempre se mostrou disposto em enriquecer essa dissertação com dados e informações de campo.

Aos membros da banca examinadora, professor Daniel Bernardon e Manoel Firmino, pela sua disponibilidade de tempo em participar dessa banca e principalmente pelas valiosas observações e críticas sobre essa dissertação.

E finalmente, aos colegas e amigos do grupo de pesquisa CEESP pelas diversas discussões técnicas e também não técnicas que, com certeza, me ajudaram na elaboração desse trabalho.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

AUTOR: PATRICK ESCALANTE FARIAS

ORIENTADOR: GHENDY CARDOSO JR, Dr. Eng.

COORIENTADOR: ADRIANO PERES DE MORAIS, Dr. Eng.

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 08 de março de 2013

Os sistemas de proteção utilizados em redes de distribuição de energia elétrica não são capazes de detectar curtos-circuitos com alta resistência de contato devido às reduzidas correntes geradas, colocando em risco a população e degradando a qualidade da energia fornecida. Neste sentido, este trabalho visa apresentar uma nova metodologia para detecção de faltas de alta impedância (FAI) em redes de distribuição de energia elétrica. O algoritmo desenvolvido possui como principal vantagem o fato de também detectar e classificar outros tipos de transitórios como, por exemplo, chaveamento de banco de capacitores, transformadores e manobras de ramais. Essa característica diminui consideravelmente as atuações indevidas causadas por transitórios oriundos de manobras. Outra característica do método desenvolvido é a não necessidade de instalação de equipamentos adicionais na rede, o que reduz consideravelmente o custo de sua implementação. Além disso, o trabalho também aborda as causas, consequências e características das FAI de forma a evidenciar as dificuldades relacionadas à sua detecção. Uma breve revisão sobre os modelos propostos na literatura para simulação computacional de FAI também é abordado, sendo que o modelo utilizado nesse trabalho é descrito em detalhes. Para avaliar o desempenho do algoritmo desenvolvido, uma série de testes com diferentes cenários de falta de alta impedância foram realizados. Além disso, outros tipos de transitórios que são normais nos alimentadores foram testados. Os bons resultados obtidos, aliado a simplicidade do método e a não necessidade de instalação de equipamentos adicionais nos alimentadores, torna a técnica promissora para aplicações reais.

Palavras-chave: Faltas de alta impedância, Detecção, Classificação; Transitórios, Distribuição, Wavelet, GRNN, PLL, Capacitor, Transformador, Carga.

ABSTRACT

Master of Science Dissertation
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

TRANSIENTS DETECTION AND CLASSIFICATION IN DISTRIBUTION NETWORKS FOR HIGH IMPEDANCE FAULTS IDENTIFICATION

AUTHOR: PATRICK ESCALANTE FARIAS

ADVISOR: GHENDY CARDOSO JR

CO-ADVISOR: ADRIANO PERES DE MORAIS

Santa Maria, March 08, 2013

Protection systems used in distribution networks of electricity are not able to detect short circuits with high contact resistance due to the low currents generated, endangering the population and degrading the quality of the energy supplied. In this sense, this paper presents a new methodology for detecting high-impedance faults (HIF) in distribution networks. The developed algorithm has the main advantage the fact also detect and classify other types of transient as, for example, switching capacitor banks, transformers and loads. This characteristic decreases the improper operation caused by transient switching. Another feature of the developed method is no need to install additional equipment on the network which greatly reduces the cost of implementation. Additionally, the paper also discusses the causes, consequences and characteristics of HIF in order to evidence the difficulties related to their detection. A brief review of the models proposed in the literature for computational simulation of HIF is also discussed, and the model used in this work is described in detail. To evaluate the performance of the algorithm developed a series of tests with different fault scenarios high impedance were made. Furthermore, other various types of transients that are normal in the feeders were tested. The good results obtained, combined the simplicity of the method and does not need to install additional equipment feeders, makes a promising technique for real applications.

Keywords: High impedance fault, Detection, Classification, Transient, Distribution, Wavelet, GRNN, PLL, Capacitor, Transformer, Load.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Lado do curto-circuito. A) lado da fonte, B) lado da carga.	24
Figura 2.2 - Experimento para caracterização de arco elétrico	25
Figura 2.3 - Formas de corrente e tensão de arco elétrico.....	26
Figura 2.4 - Oscilografia da corrente no condutor utilizado no ensaio da CESP	26
Figura 2.5 - Detalhe dos shoulders	26
Figura 2.6 - Sensor de corrente instalado em uma rede de média tensão	31
Figura 2.7 - Extensômetro	31
Figura 2.8 - Extensômetro instalado em um isolador	32
Figura 2.9 - Modelo de falta de alta impedância utilizando diodos e fonte CC	34
Figura 2.10 - Modelo de duas resistências controlada por TACS	36
Figura 2.11 - Modelo completo utilizando resistências controladas por TACS.....	36
Figura 2.12 - Interface para parametrização do modelo de falta de alta impedância	36
Figura 2.13 - Help do bloco MODELS após ser programado	37
Figura 2.14 - Característica V_{xl} de falta de alta impedância	38
Figura 2.15 - Exemplo de curva característica V_{xl} para faltas de alta impedância utilizando valores em p.u.....	39
Figura 2.16 - Corrente no ponto de falta	40
Figura 2.17 - Detalhe da assimetria da corrente no ponto de falta.....	40
Figura 3.1 - Estrutura básica de funcionamento do PLL	43
Figura 3.2 - Diagrama de blocos do PLL para uso com sinais trifásicos	43
Figura 3.3 - a) Onda senoidal, b) Wavelet (Morlet)	45
Figura 3.4 - Estrutura da análise multiresolucional da TWD	49
Figura 3.5 - Janela de dados deslizante e coeficientes de detalhe no primeiro e segundo nível.	51
Figura 3.6 - Rede de base radial	52
Figura 3.7 - Função de ativação não linear	53
Figura 3.8 - Diagrama de blocos da GRNN.....	54
Figura 4.1 - Fluxograma do algoritmo proposto.....	57
Figura 4.2 - Sinal de erro do PLL.	59
Figura 4.3 - Sistema teste utilizado para análise do sinal de erro do PLL para diversos tipos de transitórios	59
Figura 4.4 - Sinal de detalhe nos cinco primeiros níveis de decomposição	61
Figura 4.5 - Curva normal.....	62
Figura 4.6 - Fluxograma do método de detecção de transitórios	63
Figura 4.7 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da TWD.	65
Figura 4.8 - Diagrama de bloco da GRNN utilizada no algoritmo proposto	68
Figura 4.9 - Exemplo para formação da nova janela depois de detectado um transitório.....	69
Figura 4.10 - Fluxograma da condição adicional.....	70
Figura 4.11 - Sinal de erro do PLL.	70
Figura 5.1 - Sistemas testes utilizados para validação.....	74
Figura 5.2 - Interface para validação do algoritmo proposto	80
Figura 5.3 - Relatório contendo a resposta do algoritmo proposto para alguns casos testados.....	80
Figura 5.4 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível para entrada de carga	83
Figura 5.5 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível referentes ao transitório causado pela saída de carga	84

Figura 5.6 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível referentes a janela com as 128 primeiras amostras após o início do transitório	87
Figura 5.7 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível para o caso 1	89
Figura 5.8 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela formada com as 128 primeiras amostras após o início do transitório..	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Níveis típicos de correntes de curto-circuito para diferentes materiais .	24
Tabela 4.1 - Processo de treinamento da GRNN	66
Tabela 5.1 - Impedâncias acumuladas por trecho.....	74
Tabela 5.2 - Composição de ramais, tipos de manobra e numero de casos.....	76
Tabela 5.3 - Parâmetros de entrada do bloco TRAF0_S.....	79
Tabela 5.4 - Dados de curva de magnetização	79
Tabela 5.5 - Principais resultados dos testes de entrada de carga	81
Tabela 5.6 - Principais resultados dos testes de saída de carga	85
Tabela 5.7 - Principais resultados dos testes de energização de transformadores...	88
Tabela 5.8 - Principais resultados dos testes de falta de alta impedância	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Db4 - Wavelet de Daubechies 4

DF - Detector de Fase

DFM - General Electric Digital Feeder Monitor

FAI – Falta de Alta Impedância

GRNN - Generalized Regression Neural Networks

HIFAS - Nordon Technologies High Impedance Fault Analysis System

IW – Matriz de pesos da rede de base radial e GRNN

LW – Matriz contendo os índices identificadores das entradas das redes neurais
GRNN

OCT - Oscilador Controlado por Tensão

PLL – Phase Locked Loop

SEL - Schweitzer Engineering Laboratories

TVR – Time-Varying Resistance

TW – Transformada Wavelet

TWC – Transformada Wavelet Continua

TWD – Transformada Wavelet Discreta

LISTA DE SÍMBOLOS

- N_s – Número de amostras do sinal
 J_{max} – Máximo nível de decomposição da Transformada Wavelet Discreta
 c_j – Coeficiente de aproximação no nível j da Transformada Wavelet Discreta
 d_j – Coeficiente de detalhe no nível j da Transformada Wavelet Discreta.
 f_s – Frequência de amostragem
 S – Sinal qualquer. Ex. tensão, corrente
 μ - Valor médio;
 σ - Desvio padrão;
 P' – Matriz inversa de P
 $e(n)$ – Sinal de erro do PLL no instante n
 I_α – Componentes alfa de Clarke
 I_β – Componente beta de Clarke
 R_{falta} – Máxima resistência de falta no ponto de curto-circuito
 I_0 – Corrente no ramo de magnetização em regime permanente do bloco TRAFO_S do *ATPDraw*
 F_0 – Fluxo em regime permanente do bloco TRAFO_S do *ATPDraw*
 R_{mag} – Resistência do ramo de magnetização do bloco TRAFO_S do *ATPDraw*
 R_p – Resistência do enrolamento primário do bloco TRAFO_S do *ATPDraw*
 L_p – Indutância do enrolamento primário do bloco TRAFO_S do *ATPDraw*
 V_{rp} – Tensão no enrolamento primário do bloco TRAFO_S do *ATPDraw*
 R_s – Resistência no enrolamento secundário do bloco TRAFO_S do *ATPDraw*
 L_s – Indutância no enrolamento secundário do bloco TRAFO_S do *ATPDraw*
 V_{rs} – Tensão no enrolamento secundário do bloco TRAFO_S do *ATPDraw*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	16
1.2 OBJETIVO	17
1.3 MOTIVAÇÃO	18
1.4 ESTADO-DA-ARTE	18
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	22
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	22
2.2 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA (FAI)	22
2.3 ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO	28
2.3.1 SISTEMAS COM BASE EM MEDIÇÕES EXISTENTES	28
2.3.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO MECÂNICOS	29
2.3.3 MÉTODOS DE DETECÇÃO ATRAVÉS DE SENSORES DISTRIBUÍDOS NOS ALIMENTADORES	30
2.3.4 PRODUTOS COMERCIAIS PARA DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	32
2.4 MODELOS COMPUTACIONAIS PARA FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	33
2.4.1 MODELOS EXISTENTES	33
2.4.2 MODELO UTILIZADO	35
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
3 TÉCNICAS UTILIZADAS NO ALGORITMO PROPOSTO	42
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	42
3.2 PHASE-LOCKED LOOP (PLL)	42
3.3 TRANSFORMADA WAVELET	45
3.4 REDE NEURAL DE REGRESSÃO GENERALIZADA	52
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
4 METODOLOGIA PROPOSTA	56
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	56
4.2 FLUXOGRAMA	56
4.3 OBTENÇÃO DE PADRÕES ATRAVÉS DO PLL	57
4.4 DETECÇÃO DE TRANSITÓRIOS	60
4.5 CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS	64
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS	72
5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	72
5.2 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS	72
5.3 SISTEMA TESTE	73
5.3.1 MANOBRAS DE CARGAS	75
5.3.2 ENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES	76
5.3.3 ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES	78
5.3.4 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	79
5.4 RESULTADOS	80
5.4.1 CASO 1 – MANOBRA DE CARGAS	81
5.4.2 CASO 2 – ENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES	86
5.4.3 CASO 3 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES	87
5.4.4 CASO 4 – FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA	89
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92

6.1	CONCLUSÕES	92
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
6.3	CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS	93
6.4	PUBLICAÇÕES	94
	REFERÊNCIAS	95
	APÊNDICES	100

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Os sistemas de proteção são fundamentais para a segurança e para o correto funcionamento do sistema de potência. Entretanto, historicamente, alguns setores do sistema de potência recebem mais atenção e recursos financeiros que outros. Como, por exemplo, os sistemas de proteção utilizados em redes de distribuição que sempre foram defasados tecnologicamente em relação aos sistemas utilizados na transmissão e geração de energia elétrica. Entretanto, nos últimos anos este segmento do sistema de potência vem recebendo maior atenção e novas técnicas e equipamentos tem sido desenvolvidos, melhorando a sua segurança e confiabilidade. Apesar dessa evolução, alguns tipos de falhas, típicas da distribuição, ainda permanecem sem uma técnica de detecção confiável.

Entre essas falhas estão as faltas de alta impedância (FAI). Essas faltas ocorrem quando um condutor energizado de um alimentador, geralmente classe 15 kV, se rompe e entra em contato com superfícies de alta impedância. Devido à relativa baixa tensão e elevada impedância, este tipo de falta gera correntes com amplitudes muito reduzidas. Essas correntes, em grande parte dos casos, são menores que as correntes de carga do alimentador e assim, não chegam a sensibilizar os sistemas convencionais de proteção. Sendo assim, enquanto esse condutor permanecer energizado, bens materiais e também a vida de seres vivos estarão em risco.

Com o intuito de diminuir o tempo em que o condutor rompido permanece energizado e conseqüentemente os riscos atribuídos a ele, diversas pesquisas vêm sendo realizadas a fim de desenvolver técnicas para detecção de faltas de alta impedância. Alguns métodos bastante promissores, como os apresentados em Vico (2010) e Penteado Neto (2005) fazem uso de sensores de tensão e de corrente, respectivamente, instalados no decorrer dos alimentadores. Entretanto, esses métodos são, atualmente, inviáveis para aplicações práticas devido ao alto custo de implementação. Outro empecilho desse tipo de solução é o meio de comunicação entre esses sensores e as centrais de processamento. Métodos, como o proposto por Vico (2005), utilizam comunicação via rádio que é sujeita a ruídos, interferências

e possuem um alto custo para implementação e manutenção. Já o método proposto por Penteado Neto (2005), utiliza comunicação por cabo que, apesar de reduzir os riscos de ruídos e interferências, possuem um custo de implementação ainda mais elevado que os métodos que utilizam comunicação via rádio.

Outros trabalhos, como os apresentados por Sharaf (1993), Samantaray (2009), Elkalashy (2007) e Sedighi (2005) consideram o fato de que as faltas de alta impedância estão relacionadas a presença de componentes de alta frequência nos sinais de corrente e tensão. A presença dessas componentes se deve ao surgimento do arco elétrico entre o condutor energizado e a superfície de alta impedância. Esses trabalhos monitoram as componentes de alta frequência e através de técnicas, como as de reconhecimento de padrões (SARLAK, 2011), tentam identificar a ocorrência das faltas de alta impedância. A dificuldade desse tipo de técnica está no fato de que existem outras fontes de componentes de alta frequência nos sistemas de distribuição como, por exemplo, o chaveamento de bancos de capacitores e a energização de transformadores. Essas outras fontes de harmônicas, podem confundir o detectores de FAI e causar atuações indevidas.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo geral abordar os assuntos relacionados a detecção de faltas de alta impedância em redes de distribuição de energia elétrica. Dentro dessa abordagem, deseja-se deixar claro as causas, consequências e soluções propostas para esse tipo de problema. Além disso, também é objetivo deste trabalho apresentar os motivos que tornam esse tipo de falta de difícil detecção através dos sistemas tradicionais de proteção.

Ao encontro disso, esse trabalho também visa apresentar uma nova técnica para detecção de faltas de alta impedância. Além de identificar esse tipo de falta, a técnica proposta também identifica e classifica os transitórios gerados por chaveamentos de bancos de capacitores, energização de transformadores e manobras de cargas, para que não sejam geradas atuações indevidas.

1.3 Motivação

Desde o início dos anos sessenta, um elevado número de trabalhos relacionados ao assunto vem sendo publicados. Algumas dessas técnicas já estão implementadas na prática, na forma de algoritmos ou dispositivos mecânicos, entretanto nenhuma delas é completamente confiável, pois não geram atuações em todos os casos de falta e em outros casos podem gerar atuações indevidas. As técnicas mais confiáveis, como é o caso dos dispositivos mecânicos que serão comentados no Capítulo 2, possuem um custo muito elevado para a realidade financeira das concessionárias, sendo inviável sua utilização em grande escala.

A incapacidade dos sistemas atuais de proteção e a falta de uma técnica completamente confiável para detectar as faltas de alta impedância, aliado ao risco de morte que esse tipo de falta gera, são os principais fatores motivadores para esse trabalho. Além disso, o fato de criar, ao mesmo tempo, uma técnica eficiente, robusta e economicamente viável para a detecção de faltas de alta impedância torna o assunto desafiador.

1.4 Estado-da-arte

Com o objetivo de aumentar a confiabilidade e a segurança das redes de distribuição, diversos trabalhos têm sido publicados nos últimos anos com o intuito de divulgar novas técnicas para detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição. Segundo Sedighzadeh (2010), entre os anos 1960 e 2008 foram publicados em torno de 225 trabalhos sobre esse assunto. Esse elevado número de contribuições mostra que apesar das intensas pesquisas, ainda não há uma solução totalmente confiável.

Sendo assim, essa seção apresentará uma revisão sobre os trabalhos publicados nos últimos três anos sobre detecção de faltas de alta impedância em redes de distribuição.

Senger (2010) propôs uma nova função de proteção desenvolvida especificamente para detecção de faltas de alta impedância. Essa nova função monitora as correntes do alimentador medidas na subestação e opera com uma sensibilidade muito mais elevada que as proteções normais. Para evitar atuações indevidas devido a alta sensibilidade, Senger (2010) propõe a utilização de

condições adicionais que devem ser verificadas antes de gerar a atuação da função proposta. Entre essas condições adicionais, o valor da corrente de neutro deve estar acima de um valor pré-ajustado e a sua fase entre dois limiares também pré-ajustados.

Samantaray (2010) apresentou uma nova técnica para detecção de faltas de alta impedância utilizando o filtro estendido de Kalman (EKF) e o Support Vector Machine (SVM). O filtro estendido de Kalman é utilizado para extrair, da corrente de falta, a componente fundamental e as componentes harmônicas de ordem ímpar até a décima terceira. Essas componentes são utilizadas como entrada no SVM que foi previamente treinado com as componentes de frequência de algumas faltas de alta impedância e outros transitórios simulados. A técnica proposta por Samantaray (2010) monitora a corrente de falta a todo instante e classifica as componentes de frequência como falta de alta impedância ou regime normal de funcionamento. Um inconveniente do trabalho proposto por Samantaray (2010) é o fato de não estar explícito onde é realizada a aquisição dos dados de corrente utilizados nos cálculos, se na subestação ou no ponto de falta, sendo que essa segunda opção seria inviável. No decorrer do trabalho, os dados de entrada do algoritmo são citados apenas como “corrente de falta”.

Ghaffarzadeh (2010), Vahidi (2010) e Baqui (2011) utilizam a transformada wavelet, para extrair as características dos sinais de correntes durante as faltas de alta impedância e de outros transitórios. Essas características são então utilizadas no processo de treinamento de uma rede neural do tipo *back-propagation* que é utilizada para diferenciar a ocorrência das faltas de alta impedância de outros transitórios. O principal inconveniente dessas técnicas propostas é a amostragem utilizada. Em Vahidi (2010) é utilizada 20 kHz, Ghaffarzadeh (2010) é 24 kHz e em Baqui (2011) 25,6 kHz. Essas amostragens são consideradas muito elevadas para maioria das aplicações reais.

Vico (2010) apresentou uma revisão dos métodos mecânicos e elétricos existentes atualmente para detecção de faltas de alta impedância. Também são apresentadas as experiências de campo utilizando a tecnologia digital na detecção das faltas de alta impedância.

Sarlak (2010) propôs um novo algoritmo para reconhecimento de padrões. Esse algoritmo é utilizado na detecção de faltas de alta impedância em redes de distribuição e identificação de fenômenos similares como o chaveamento de banco

de capacitores e de carga. Tal algoritmo emprega o gradiente morfológico multiresolução (MMG) para extração das características das correntes dos três meio ciclos posteriores a ocorrência do distúrbio. Essas características são utilizadas no treinamento de uma rede neural que, após o treinamento, irá classificar os transitórios.

Sarlak (2011) utiliza a transformada wavelet discreta para extrair as características dos sinais de corrente dos três meio ciclos seguintes a ocorrência de uma falta de alta impedância devido a queda de um condutor ou por arco-elétrico. Essas características são então utilizadas no treinamento de um SVM que classificará o distúrbio como falta ou não falta.

Gautam (2012) propôs a utilização da morfologia matemática para detecção de faltas de alta impedância e distinção desse tipo de falta de outros distúrbios em redes de distribuição. Ao contrario de grande parte das técnicas propostas, essa utiliza os sinais de tensão medidos na subestação e não os sinais de corrente. Segundo Gautam (2012), essa diferença se deve ao fato de que as características das distorções nos sinais de tensão, no momento da falta de alta impedância, independem da corrente de pré-falta o que não ocorre com os sinais de corrente. Isso torna mais simples o processo de identificação dos distúrbios.

Recentemente, Milioudis (2012) propôs uma nova técnica para detecção de faltas de alta impedância utilizando o conceito de smart grids. Essa técnica monitora a impedância da rede através de uma tecnologia conhecida como PLC (*Power Line Communications*) que sobrepõe sinais de frequência diferentes da fundamental para comunicação. No momento em que ocorre uma variação abrupta nessa impedância, o algoritmo acusa a ocorrência de uma falta de alta impedância.

1.5 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2, serão abordadas as causas, consequências e características das faltas de alta impedância em redes de distribuição. Nesse capítulo também será apresentado as possíveis estratégias de solução mais utilizadas atualmente e que apresentam resultados mais promissores.

No Capítulo 3, os métodos matemáticos utilizados no algoritmo proposto neste trabalho são descritos detalhadamente. Essa descrição será realizada de

maneira a direcionar a aplicação dos métodos para a forma como foram utilizados no algoritmo proposto por este trabalho.

No Capítulo 4, é apresentada, através de um fluxograma, a estrutura do algoritmo proposto para detecção de faltas de alta impedância e classificação de transitórios. Além disso, todos os ajustes e parametrizações utilizados são informados e justificados com o intuito de melhorar a compreensão da técnica.

O Capítulo 5 apresenta o sistema teste e os modelos de transitórios utilizados no processo de validação do algoritmo apresentado no Capítulo 4. Os resultados obtidos nas simulações, bem como as discussões referentes a esses resultados, também são apresentados nesse capítulo.

Para finalizar, no Capítulo 6, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

2.1 Considerações Gerais

Os curtos-circuitos nas redes de distribuição de energia elétrica sempre foram motivos de estudos e preocupação para os engenheiros das concessionárias. Com o passar dos anos, os sistemas de proteção evoluíram, agregando novas tecnologias e equipamentos. Essa evolução melhorou significativamente a confiabilidade das redes de distribuição. Entretanto, ainda existem problemas referentes à proteção que permanecem sem solução. Um desses problemas é o da Falta de Alta Impedância (FAI).

Para tratar sobre esse assunto, este Capítulo será dividido em quatro partes. A primeira descreve as causas, consequências e características das FAI em sistemas de média tensão. Na segunda parte será explicado por que as FAIs são de difícil detecção e por qual motivo os atuais sistemas de proteção são ineficientes quando se trata em detecção de FAI. Essas duas primeiras partes tem o intuito de justificar a importância do desenvolvimento de uma técnica para detecção desse tipo de falta que seja rápida, eficiente e robusta. A terceira parte apresenta as diversas estratégias de solução propostas na literatura para detectar ou evitar a ocorrência das FAIs. Além dessas técnicas, também serão apresentados dois equipamentos para detecção de FAIs comercialmente disponíveis. Por fim, na subseção 2.4 será realizada uma breve revisão sobre os modelos de faltas de alta impedância propostos na literatura. O modelo escolhido para ser utilizado nesse trabalho será detalhado.

2.2 Faltas de Alta Impedância (FAI)

A preocupação das distribuidoras de energia elétrica com os curtos-circuitos em suas redes de distribuição é constante. Esses curtos-circuitos quando não detectados e corrigidos rapidamente podem causar danos aos equipamentos da rede, risco de acidentes com seres vivos, além de implicarem na interrupção do fornecimento, gerando prejuízos financeiros e à imagem das concessionárias. Quando esses curtos-circuitos são provenientes do contato de um condutor

energizado que se rompeu com superfícies de alta resistividade elétrica como galhos de árvores, asfalto, areia ou pedras, produzem correntes elétricas de amplitude muito reduzidas. Outro tipo de falta bastante comum nos sistemas de distribuição são as fugas de corrente elétrica em isoladores. Essas fugas são, geralmente, causadas pelo acúmulo de poeira na superfície do isolador ou por erros no processo de produção que acabam deixando pequenos orifícios no isolador. Caso o poste em que esse isolador está instalado seja aterrado, o curto-circuito irá ter uma impedância menor e os sistemas tradicionais de proteção provavelmente irão atuar. Entretanto, se esse poste não for aterrado e ainda estiver instalado em superfícies com alta impedância como, por exemplo, solos arenosos ou tiver a sua base concretada, a impedância da falta será elevada e pode ocorrer que o sistema de proteção não atue. Nesse caso o condutor permanecerá energizado colocando em risco seres vivos que possam vir a entrar em contato com esse poste.

Devido as inúmeras possibilidades de curtos-circuitos que podem ocorrer nos sistemas de distribuição, nesse trabalho serão abordados apenas os curtos-circuitos causados pelo contato ao solo de condutores rompidos da rede primária. Alguns valores típicos de correntes de falta para certas superfícies podem ser vistos na tabela 2.1. Segundo Wester (1998), normalmente essas correntes permanecem entre 0 e 50 A, que na maioria dos casos são da mesma ordem de grandeza ou até inferiores, as correntes de carga dos alimentadores. Curtos-circuitos dessa natureza são denominados de Faltas de Alta Impedância.

Um fato que pode reduzir ainda mais as correntes de curto-circuito envolvendo essas superfícies ocorre quando o condutor que entrou em contato com esses materiais está do lado da carga. Para melhor compreender essa afirmação, pode-se analisar a figura 2.1. Nessa figura, pode-se perceber que os curtos-circuitos do lado da carga possuem, além da impedância da falta (R_f) também a impedância da carga, ao contrario das faltas do lado da fonte, que possuem apenas a impedância da falta (R_f) para limitar a corrente. Por isso as correntes de curto-circuito do lado da carga são ainda menores do que quando a falta é do lado da fonte.

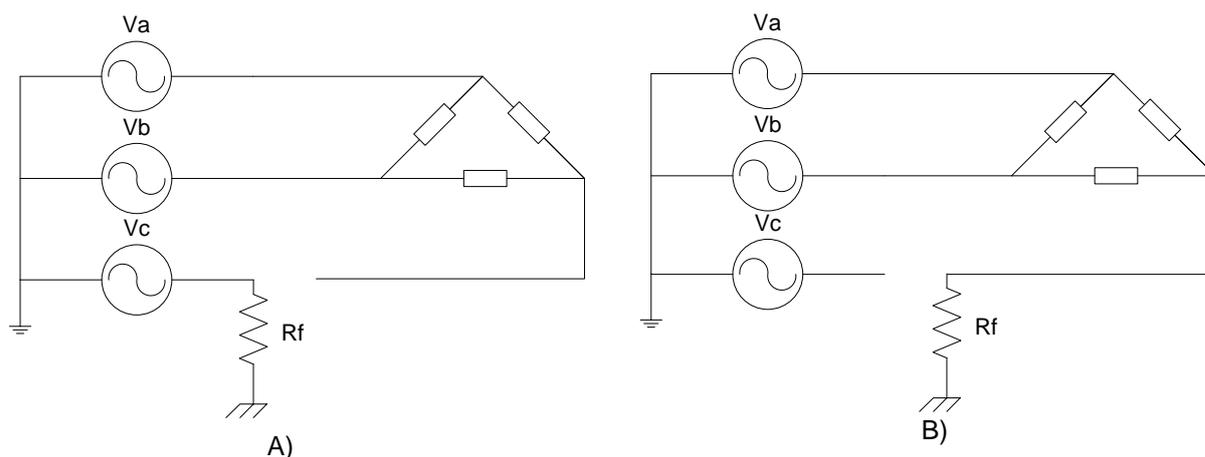


Figura 2.1 - Lado do curto-circuito. A) lado da fonte, B) lado da carga.

Tabela 2.1 - Níveis típicos de correntes de curto-circuito para diferentes materiais

Superfícies	Corrente (A)
Asfalto seco	0
Areia seca	0
Concreto (não armado)	0
Areia molhada	15
Gramma seca	25
Gramma molhada	50
Concreto (armado)	75

Fonte: Russel (1989)

Diversos fatores tornam as correntes geradas pelas faltas de alta impedância aleatórias e dinâmicas. Um condutor energizado ao entrar em contato com o solo gera arcos elétricos. A presença desse arco elétrico pode fazer com que o condutor não permaneça parado na superfície do solo devido ao surgimento de uma força eletromagnética. A magnitude da corrente de falta se altera à medida que a umidade da superfície do solo é reduzida em função do calor gerado pela falta e/ou à medida que os materiais de silício do solo são aquecidos, transformando-se em substâncias vitrificadas. Os solos, durante diferentes estações do ano e de acordo com diversas regiões geográficas, também produzem diferentes amplitudes de correntes de falta.

O arco elétrico presente nas FAI é o responsável pela assimetria na corrente de falta em todos os ciclos durante a falta. Essa assimetria é traduzida em componentes de frequência distintas da fundamental e está relacionada a variação na resistência elétrica do arco elétrico e das superfícies durante a FAI.

Para analisar a característica assimétrica da corrente do arco elétrico, Emanuel (1990) realizou um experimento sobre o comportamento do arco elétrico no interior de um solo arenoso. O experimento apresentado na figura 2.2 consiste na

aplicação da tensão secundária (7,9 kV) de um transformador em um vaso metálico cilíndrico (diâmetro = 30 cm e altura = 50 cm) contendo areia. Um resistor variável é conectado em série para simular e variar a resistência de terra.

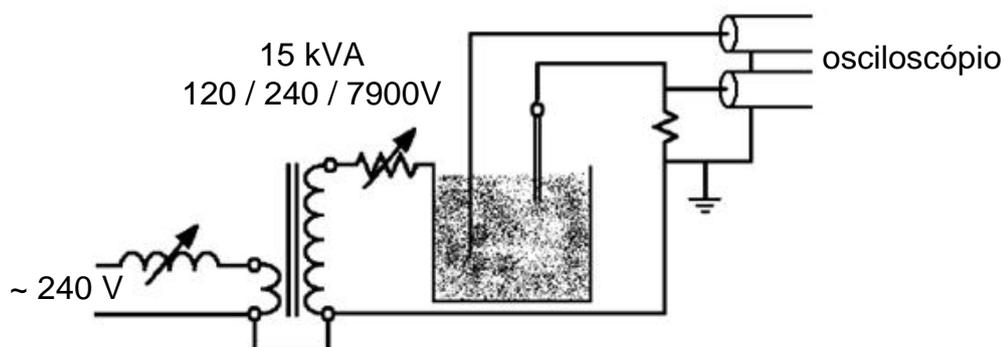


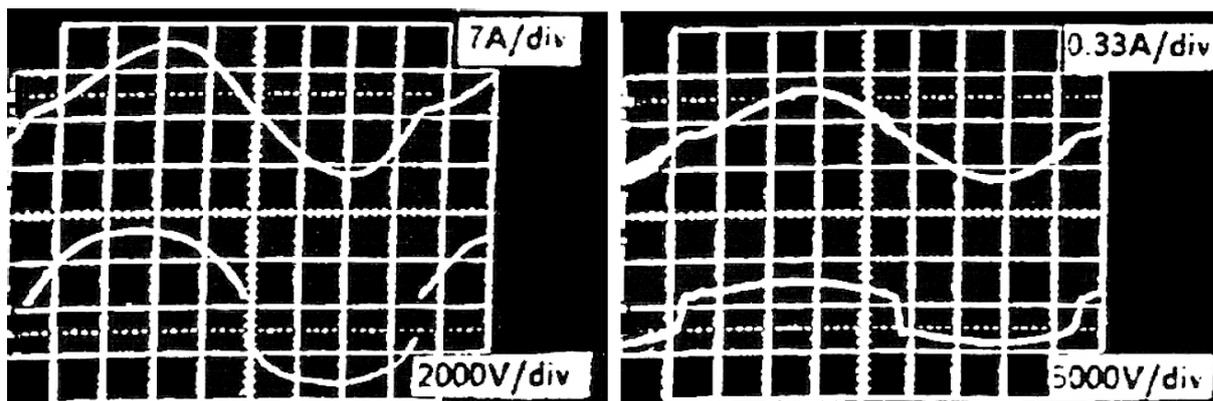
Figura 2.2 - Experimento para caracterização de arco elétrico

Fonte: Emanuel (1990)

Os resultados obtidos no experimento são apresentados na figura 2.3. Nessa figura, pode-se perceber a assimetria nos sinais de corrente característica do arco elétrico, sendo que a magnitude do semi-ciclo positivo é maior que a do semi-ciclo negativo. Esse comportamento é característico de faltas tanto com grande corrente de curto-circuito (figura 2.3a) como com pequena corrente de curto-circuito (figura 2.3b), desde que haja a ocorrência de arco.

Em 1985 a CESP realizou um ensaio de faltas de alta impedância lançando um cabo energizado a partir de um veículo de manutenção de linhas vivas em diversos pontos ao redor de uma subestação. Na figura 2.4 se pode observar a oscilografia do sinal de corrente do condutor que foi utilizado no ensaio. Nessa figura, pode-se notar o aspecto do crescimento da envoltória da corrente de defeito. Este comportamento é típico e se repete em quase todas as medições do ensaio, sendo conhecido como fase de *buildup* da corrente de falta de alta impedância. O tempo de duração da etapa de *buildup* está relacionado ao tempo de acomodação do condutor energizado no solo.

Como pode ser visto na figura 2.5, durante a etapa de *buildup*, existem alguns trechos em que a amplitude permanece constante durante um determinado tempo antes de voltar a crescer. Esses trechos são denominados de *shoulders*.



(a) Correntes altas

(b) Correntes baixas

Figura 2.3 - Formas de corrente e tensão de arco elétrico.

Fonte: Emanuel (1990)

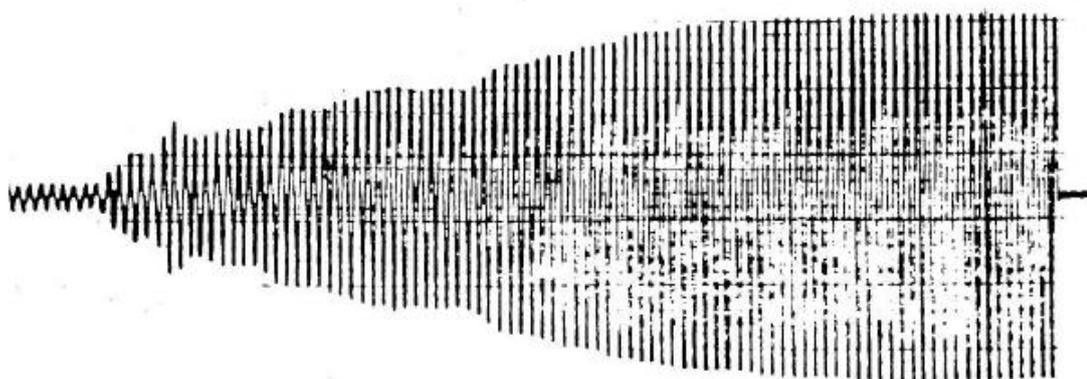


Figura 2.4 - Oscilografia da corrente no condutor utilizado no ensaio da CESP

Fonte: CESP (1985)

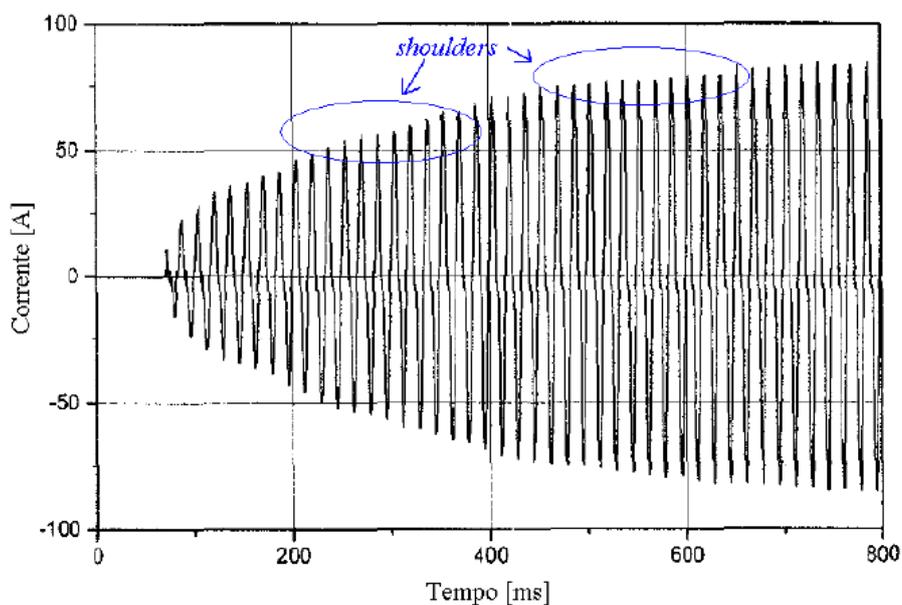


Figura 2.5 - Detalhe dos shoulders

Fonte: CESP (1985)

Entre as concessionárias distribuidoras de energia elétrica existem diferentes opiniões sobre a frequência em que ocorrem as FAI. Esse impasse se deve aos poucos registros sobre a ocorrência desse tipo de falta, pois apenas os curtos-circuitos que resultam na operação de uma chave fusível ou de um relé são registrados. Entretanto, segundo Wester (1998) entre 5% e 20% de todas as faltas que ocorrem na distribuição são faltas de alta impedância.

Conforme Tengdin (1996), a maior parte das FAI ocorrem em sistemas de distribuição classe 15 kV e inferiores, com o problema se tornando mais grave conforme a tensão vai diminuindo. Apesar do problema da FAI ser menos severo nos sistemas classe 25 kV ou com tensões superiores, também pode ocorrer nesses níveis de tensão.

Os sistemas de distribuição são protegidos, atualmente, por relés de sobrecorrente de fase e neutro instantâneo e temporizados, chaves-fusíveis e religadores. Normalmente, o ajuste dos equipamentos de sobrecorrente (relés, chaves-fusíveis e religadores) é realizado de maneira a não atuar para correntes inferiores a 1,5 vezes a corrente de carga do trecho protegido. Devido a isso, esse sistema é, geralmente, ineficiente quando se deseja detectar as FAIs, devido as suas reduzidas correntes de curto-circuito.

A grande presença de ramais monofásicos na rede primária, principalmente em circuitos rurais, gera um desequilíbrio natural nos sistemas de distribuição. Esse desequilíbrio não deve sensibilizar os relés de neutro, por isso esse dispositivo, na distribuição, possui um ajuste elevado (próximo a 30% da corrente de carga máxima) o que torna inviável a detecção das FAIs por meio do elemento residual.

Devido à ineficiência dos métodos atuais de proteção para detecção de FAI, quando ocorre o rompimento de um condutor da rede primária e esse entra em contato com superfícies de alta impedância, esse permanece energizado por tempo indeterminado. Atualmente a única maneira de a concessionária tomar conhecimento do rompimento desse condutor, nessa situação, é por meio de informações de falta de energia através de consumidores ou agentes públicos. Apesar das FAIs representarem um reduzido risco de danos aos equipamentos do sistema elétrico, devido às pequenas correntes geradas, enquanto esse condutor permanecer energizado ele pode provocar inúmeros danos a propriedades e colocar em risco a vida de pessoas e animais, podendo causar queimaduras e morte.

2.3 Estratégias de Solução

Devido aos problemas causados pelas FAIs e a dificuldade em detectá-las, diversas pesquisas são realizadas no sentido de desenvolver novas alternativas para solucionar ou minimizar os danos das FAI.

Nas últimas duas décadas muitas técnicas tem sido propostas no sentido de aperfeiçoar a detecção das FAIs nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Essas técnicas de detecção podem ser divididas em:

- métodos de detecção com base em medições existentes;
- métodos de detecção mecânicos;
- métodos de detecção através de sensores distribuídos nos alimentadores.

2.3.1 Sistemas com Base em Medições Existentes

As técnicas para detecção de FAIs com base em medições existentes são algoritmos que utilizam sinais de corrente e/ou tensão já adquiridos por processadores numéricos como os relés nas subestações ou religadores distribuídos nos alimentadores. Esses algoritmos podem ser implementados como funções adicionais nesses equipamentos. Essa metodologia possui como principal benefício o reduzido custo de implementação, pois faz uso de informações já existentes no sistema.

Esses métodos podem ser divididos em dois grupos, algoritmos no domínio no tempo e algoritmos no domínio da frequência. Os algoritmos no domínio do tempo (Sharaf, 2003; Hou, 2006; Senger, 2010; Xu, 2010) possuem uma implementação e um entendimento mais simples que os algoritmos no domínio da frequência, entretanto possuem uma maior limitação quando utilizados para detecção de FAIs. Por exemplo, as técnicas que utilizam relés de sobrecorrente de sequencia zero e negativa (Bo, 2002) não são totalmente eficazes, pois as FAI não provocam grandes variações na amplitude de corrente e tensão quando estes valores são vistos pelos dispositivos de proteção alocados nas subestações. Essa reduzida variação faz com que o ajuste de disparo do algoritmo seja muito sensível, o que pode provocar disparos indevidos quando, por exemplo, ocorrer uma abertura monopolar em um ramal.

No domínio da frequência, vários trabalhos têm sido publicados utilizando a Transformada de Fourier (TF) para análise das componentes harmônicas geradas

pelas faltas de alta impedância. Devido às limitações da Transformada de Fourier quando aplicada a sinais não estacionários, caso das FAIs, outras técnicas vem sendo propostas na literatura como Filtro de Kalman (Samantaray, 2009, 2010) e Redes Neurais (Sharaf, 1993; Keyhani, 2001; Samantaray, 2008; Michalik, 2008). Entretanto, na última década a maior parte das publicações referentes a detecção de FAIs em sistemas de distribuição fazem uso da Transformada Wavelet (Yang, 2004; Sedighi, 2005; Lai, 2005; Elkalashy, 2007, 2008; Sarlak, 2011). Um dos motivos que estão levando os pesquisadores a utilizarem essa ferramenta na elaboração de algoritmos para detecção de FAIs é a capacidade que a Transformada Wavelet tem de trabalhar tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Outra importante vantagem da Transformada Wavelet em relação às outras ferramentas matemáticas utilizadas até então, é sua capacidade de trabalhar com sinais não estacionários, característica indispensável para detecção de FAIs.

2.3.2 Métodos de Detecção Mecânicos

Os métodos de detecção mecânicos geralmente envolvem um meio de forçar o contato entre o condutor rompido e um aterramento sólido para que os sistemas convencionais de sobrecorrente operem.

Vico (2010) cita dois métodos mecânicos existentes atualmente para detecção de FAIs. O primeiro consiste em um dispositivo mecânico instalado no poste ou na cruzeta abaixo de cada condutor. A força do condutor caindo libera uma mola que ejeta um barramento para fazer contato com o condutor que esta caindo e criar uma baixa impedância de falta. Devido a essa baixa impedância, a corrente de curto-circuito criada irá ter um valor elevado o que faz atuar a proteção convencional de sobrecorrente. Para a cobertura bidirecional, seis unidades devem ser instaladas em cada poste. Embora o custo de montagem seja alto, a instalação em áreas de risco como escolas hospitais e igrejas é de grande valia.

O segundo método mecânico para detecção de FAIs apresentado por Vico (2010) utiliza um pendulo de alumínio que possui a sua extremidade em forma de gancho. Esse pendulo é suspenso por um condutor neutro (aterrado) construído abaixo da rede. Quando o condutor de fase se rompe e começa a cair em direção ao solo é “pego” pela extremidade em forma de gancho do pendulo produzindo um curto-circuito de baixa impedância fazendo com que a proteção convencional de

sobrecorrente atue. Tipicamente, duas unidades são instaladas por vão. Condutores que se rompem, mas não entram em contato com a terra ou objetos aterrados, podem ser detectados por esse método mecânico. Vico (2010) ainda afirma que gelo, vento e galhos de árvores podem causar uma falsa atuação do sistema de proteção em alimentadores que utilizam esse método.

2.3.3 Métodos de Detecção Através de Sensores Distribuídos nos Alimentadores

Durante os anos diversos tipos de sensores vêm sendo utilizados nos sistemas de distribuição com o intuito de detectar FAIs. Um dos sensores utilizados é os de tensão. Segundo Vico (2010), esses sensores são instalados no final de cada ramal e quando a tensão em uma das fases cai abaixo de um valor pré-definido, caracterizando a ruptura de um condutor, um transmissor envia um sinal pelo condutor neutro até um dispositivo de manobra a montante do sensor. Esse dispositivo abre seus contatos caso haja tensão nele. Esse tipo de sistema possui a desvantagem de necessitar do condutor neutro para enviar o sinal de comando ao dispositivo de manobra, ou seja, funciona apenas em sistemas com neutro contínuo. Esse sistema pode desenergizar uma área maior que a necessária caso uma chave fusível entre o sensor e o dispositivo de manobra telecomandado opere fazendo com que a tensão no sensor caia e esse mande a chave telecomandada operar.

Outro tipo de sensor que vem sendo utilizado na detecção de FAIs é o sensor de corrente. Penteado Neto (2005) propõe a construção de sensores de corrente com comunicação via rádio. O esquema de proteção proposto por Penteado Neto (2005) utiliza três sensores de corrente, um em cada fase. Esses sensores monitoram a corrente elétrica em cada fase e enviam via rádio para uma central essas informações. Quando a defasagem angular entre as correntes se altera, situando-se próximo de 180° o algoritmo entende que um condutor se rompeu e anuncia a ocorrência de uma FAI.

Na figura 2.6, pode-se ver o sensor de corrente proposto instalado em uma rede de média tensão.

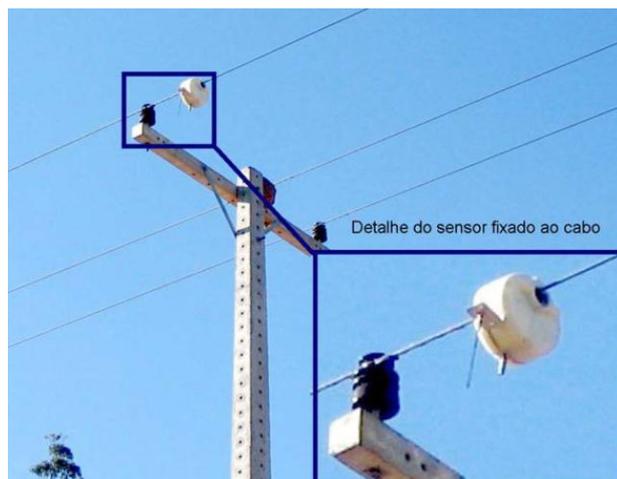


Figura 2.6 - Sensor de corrente instalado em uma rede de média tensão
Fonte: Penteadado Neto (2005)

Outro tipo de sensor utilizado na detecção de FAIs é o extensômetro. Os extensômetros funcionam com base no princípio da variação da resistência elétrica dos materiais conforme se varia a deformação física que esses experimentam. Dessa forma, converte-se o efeito mecânico em um sinal elétrico proporcional. Os sistemas que utilizam esse tipo de sensor se fundamentam no fato que, no instante em que ocorre o rompimento de um condutor elétrico, a tração mecânica nos isoladores que sustentam esse condutor se altera. Essa alteração é detectada e comunicada remotamente pelos sensores que estão instalados nos isoladores, de modo a permitir ações por parte do operador da rede. Esse tipo de sensor pode ser instalado tanto nos isoladores de pino como nos de ancoragem. Entretanto a variação da tração nos isoladores de ancoragem é muito maior que nos de pino, o que geralmente torna necessária a instalação de extensômetros mais sensíveis nos isoladores de pino. A figura 2.7 apresenta um extensômetro, enquanto na figura 2.8 pode-se vê-lo sendo instalado em um isolador.

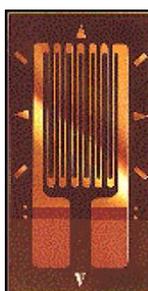


Figura 2.7 - Extensômetro
Fonte: Penteadado Neto (2005)



Figura 2.8 - Extensômetro instalado em um isolador
Fonte: Penteado Neto (2005)

2.3.4 Produtos Comerciais para Detecção de Falhas de Alta Impedância

Atualmente existem três produtos comerciais para detecção de FAI em sistemas de distribuição. O primeiro faz parte de uma pesquisa realizada pela *Texas A&M University*. O *General Electric Digital Feeder Monitor (DFM)* analisa componentes harmônicas e não harmônicas, entre 30 e 780 Hz, nas correntes do alimentador através do uso de reconhecimento de padrões e inteligência artificial. Um sistema inteligente com nove diferentes algoritmos é empregado para detectar e classificar as FAIs. O DFM diferencia queda de condutores, arco elétrico fixo e arco elétrico intermitente.

O segundo produto comercial para detecção de FAIs é o *Nordon Technologies High Impedance Fault Analysis System (HIFAS)*. Esse equipamento mede o ângulo de fase da corrente da terceira harmônica em relação a tensão fundamental. O princípio de funcionamento desse equipamento é que a corrente gerada pela FAI produz uma corrente de terceira harmônica com uma relação de fase única com a tensão de fase. De forma simplificada o HIFAS atua da seguinte maneira: o valor médio do fasor da terceira harmônica é calculado no tempo e armazenado para comparação. Quando uma falta ocorre, o novo fasor da terceira harmônica é vetorialmente subtraído do valor armazenado. Se o resultado dessa subtração for maior que um valor pré-definido e o ângulo coincide com o valor ajustado para a queda de condutores, uma falta é detectada.

O terceiro produto já comercialmente distribuído para detecção de FAI está implementado nos relés mais modernos da empresa Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). Esse produto consiste em um algoritmo apresentado em Hou (2007) bastante simples. Basicamente esse algoritmo calcula ponto a ponto a diferença entre dois ciclos dos sinais de corrente e então soma os resultados dessas diferenças. Durante o regime normal de funcionamento, o resultado desse cálculo é próximo de zero, entretanto quando uma FAI ocorre a presença de arco elétrico faz com que a diferença entre dois ciclos produza resultados diferentes de zero. Quando o valor calculado para essa diferença for maior que um limiar pré-definido o algoritmo acusa a ocorrência de uma FAI. O limiar de disparo do algoritmo utiliza dados passados já calculados das diferenças entre dois ciclos.

2.4 Modelos Computacionais para Faltas de Alta Impedância

Devido ao crescente interesse dos pesquisadores sobre os estudos referentes a detecção de faltas de alta impedância, diversos trabalhos vem sendo publicados propondo um modelo computacional para esse tipo de transitório.

2.4.1 Modelos existentes

O modelo mais simples de falta de alta impedância utiliza uma resistência fixa conectada entre o ponto de falta e a terra. Esse modelo possui a desvantagem de não gerar nenhum tipo de distorção na forma de onda da corrente. No entanto, sabe-se que, em muitos casos de faltas de alta impedância há o aparecimento de arcos elétricos, os quais causam muitas distorções na forma de onda da corrente. Devido a isso, esse modelo é pouco utilizado pelos pesquisadores.

Outro modelo para faltas de alta impedância proposto na literatura é utilizado em Sharaf (2003), Xiangjun (2002), entre outros trabalhos. Esse modelo utiliza uma impedância de falta variável, conectada entre o ponto de falta e a terra. Essa impedância contém uma resistência de falta R_f calculada conforme a equação (2.1) e uma indutância de falta L_f que possui um valor típico igual a 3mH.

$$R_f = R_{f0} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{i_f}{I_{f0}}\right)^\beta\right) \quad (2.1)$$

Onde:

R_{f0} é a resistência de falta inicial;

α coeficiente;

β coeficiente;

I_f é a corrente de falta;

I_{f0} é a corrente de falta inicial.

Com exceção das variáveis R_f e I_f , todas as outras variáveis da equação (2.1) são definidas pelo usuário e dependem das características elétricas do sistema em que o modelo está sendo implementado. Isso faz com que esse modelo seja muito específico para cada sistema elétrico, invalidando sua aplicação em muitos casos.

Outro modelo bastante simples para faltas de alta impedância é proposto por Emanuel (1990). Esse modelo utiliza dois diodos e duas fontes de tensão contínua, conectadas em antiparalelo. Entre a fonte e os diodos são conectadas uma resistência R_f e uma indutância L_f que representam, respectivamente, a resistência de falta e a característica não linear da FAI. Esse modelo é ilustrado na figura 2.9.

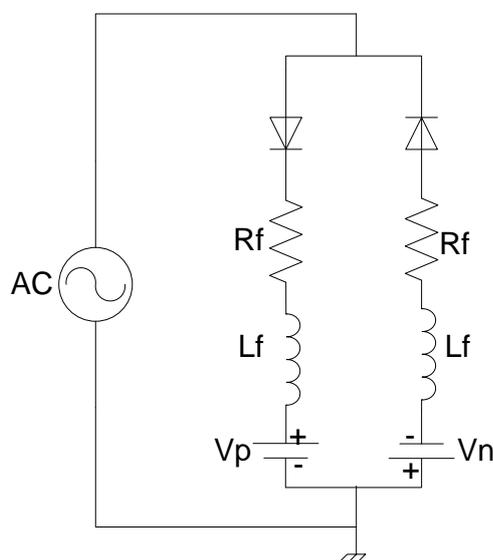


Figura 2.9 - Modelo de falta de alta impedância utilizando diodos e fonte CC

Quando a tensão da fonte AC for maior que a tensão V_p , a corrente de curto-circuito irá fluir da fonte para a terra. Quando a tensão AC for menor que V_n , a corrente irá ter sentido contrário, ou seja, da terra para a fonte. Nos casos em que a

tensão AC está entre V_p e V_n , AC é contrabalaneada por V_p ou V_n de tal maneira que não circulará corrente de falta.

2.4.2 Modelo utilizado

O modelo utilizado nesse trabalho foi proposto por Nakagomi (2006) e é uma versão modificada do modelo inicialmente proposto por Nan (2001). O modelo de Nakagomi (2006) faz uso, basicamente, de duas resistências variáveis (*TVR – Time-Varying Resistance – Type 91* do ATPDraw[®]) em série controladas por TACS, conforme a figura 2.10.

Esse modelo foi escolhido por ser o que melhor descreve as principais características de uma falta de alta impedância. A primeira resistência (HZR1) é responsável por reproduzir a distorção e assimetria observadas em todos os ciclos da corrente de falta. A segunda resistência (HZR2) começa com um valor relativamente elevado e vai diminuindo seu valor de forma gradativa ao longo tempo, de forma a representar o crescimento típico da corrente verificado na etapa de acomodação do condutor rompido no solo (período de *buildup*). O controle dessas resistências, bem como as funções matemáticas utilizadas para garantir essas características às resistências foi implementado na ferramenta *MODELS* da interface ATPDraw[®]. Essa ferramenta permite a programação de funções matemáticas, lógicas e laços no software ATPDraw[®] de forma similar a linguagem C.

O modelo completo proposto por Nakagomi (2006) pode ser visto na figura 2.11. Nesse modelo, três chaves controladas por TACS (TACS-controlled TYPE 13 switch do ATPDraw[®]) são utilizadas, além das duas resistências. Essas chaves também são controladas por *MODELS* e definem se a falta será do lado da carga (t_2 fechada) ou da fonte (t_1 fechada) e o tempo que o condutor leva até entrar em contato com o solo (t_3). É o usuário que define qual chave vai fechar e em que instante. Essa parametrização é feita através da interface da figura 2.12 que pode ser acessada com um clique duplo sobre o bloco *MODELS* depois que esse foi programado. A figura 2.13 apresenta o *Help* do bloco *MODELS*, após a programação, onde cada variável é definida. O tempo em que a chave t_3 é comutada não aparece nos parâmetros a serem definidos, como mostra a figura 2.12, pois nesse trabalho esse parâmetro foi considerado como uma constante igual a 1,3 segundos.

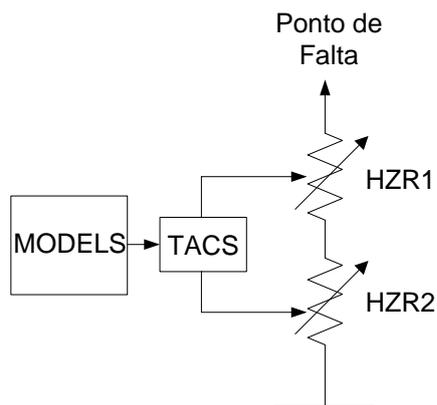


Figura 2.10 - Modelo de duas resistências controlada por TACS

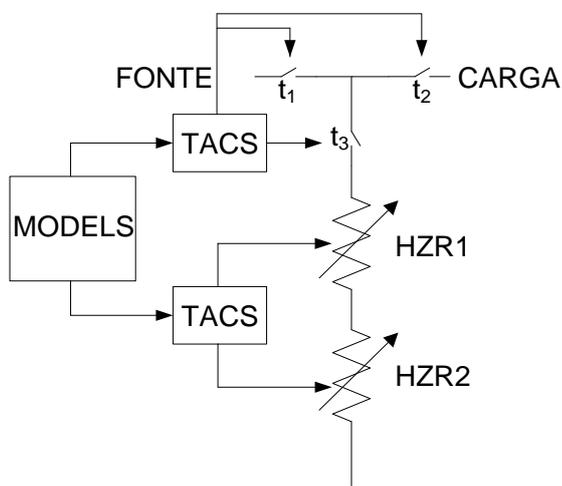


Figura 2.11 - Modelo completo utilizando resistências controladas por TACS

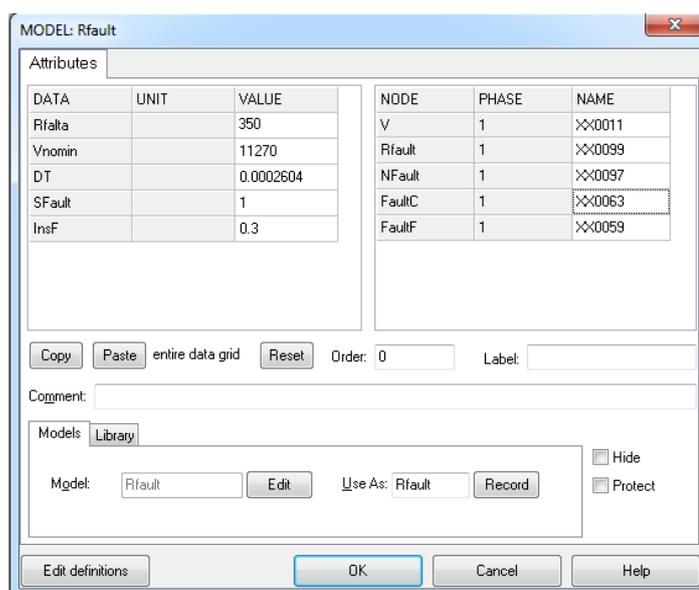


Figura 2.12 - Interface para parametrização do modelo de falta de alta impedância

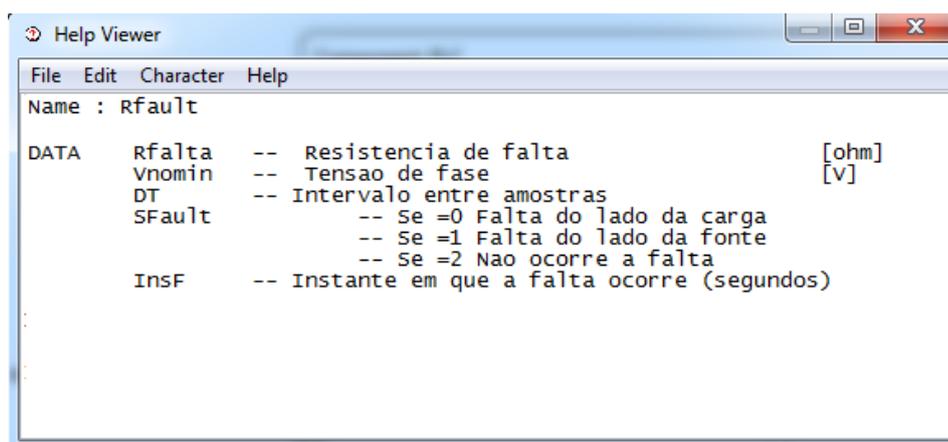


Figura 2.13 - Help do bloco MODELS após ser programado

2.4.2.1 Controle da Resistencia HZR1

O objetivo do controle da resistência HZR1 é reproduzir a distorção e a assimetria presentes na corrente de falta enquanto existir o arco elétrico. Para isso, foi implementado no bloco MODELS uma rotina que calcula, para cada instante de tempo, o valor da resistência HZR1 em função da tensão de fase existente no ponto de falta naquele instante. Essa rotina é implementada de forma a reproduzir a característica V_{xl} da falta como a mostrada na figura 2.14. Essa característica é constituída por dois semi-ciclos, o semi-ciclo positivo, composto pelos valores que definem o aumento da tensão e da corrente, partindo do menor ao maior valor de ambas as grandezas e o semi-ciclo negativo, definido pelos pontos que iniciam no maior valor de tensão e corrente e terminam nos menores valores das grandezas. Na figura 2.14 a curva sobe pelos pontos em vermelho (semi-ciclo positivo) e desce pelos pontos em azul (semi-ciclo negativo).

Dada a tensão no ponto de falta em determinado instante de tempo, verifica-se se a tensão está no semi-ciclo positivo ou negativo da figura 2.14, obtém-se, através de uma interpolação, a corrente de falta e a seguir se calcula a correspondente resistência através da 1ª Lei de OHM.

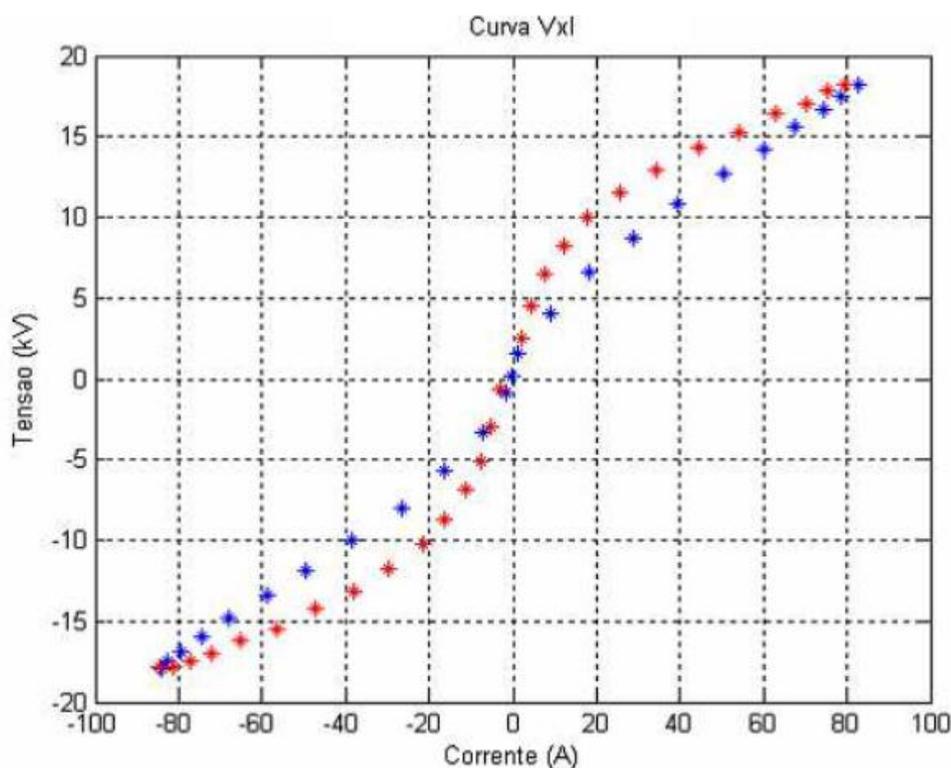


Figura 2.14 - Característica V_{xl} de falta de alta impedância
 Fonte: Nakagomi (2006)

A fim de tornar esse modelo mais genérico, Nakagomi (2006) normalizou os pontos da curva da figura 2.14 em p.u. A vantagem dessa solução é que faltas com diferentes valores de resistência de falta (R_{falta}) podem ser simuladas utilizando a mesma curva característica V_{xl} em p.u. Assim as correntes de falta simuladas terão diferentes amplitudes, porém com a mesma forma. Dessa maneira, para utilizar os dados da curva proposta por Nakagomi (2006), a equação (2.2) foi implementada no bloco *MODELS* para passar a curva V_{xl} de p.u para valores reais. A figura 2.15 apresenta um gráfico de uma curva V_{xl} em p.u.

$$I_{Base} = \frac{V_{Base}}{R_{falta}} \quad (2.2)$$

Nessa equação, V_{base} é a tensão nominal de fase do alimentador, R_{falta} é a máxima resistência de falta no ponto onde ocorreu o curto-circuito.

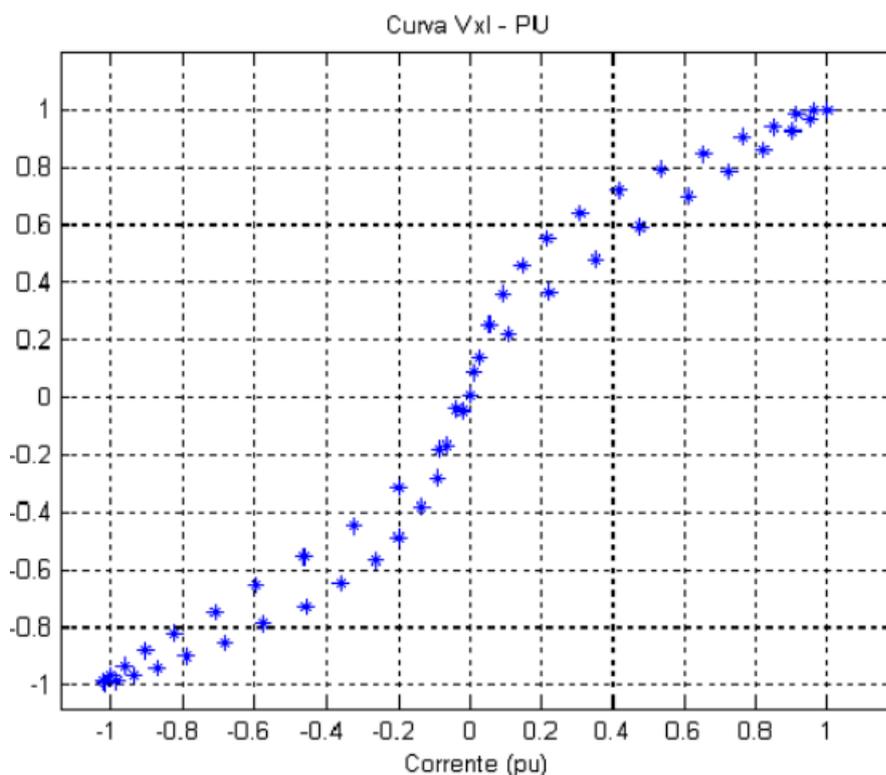


Figura 2.15 - Exemplo de curva característica V_{xl} para faltas de alta impedância utilizando valores em p.u

Fonte: Nakagomi (2006)

2.4.2.2 Controle da Resistência HZR2

O controle da resistência HZR2 é responsável pela característica de crescimento da corrente durante a etapa de acomodação do condutor no solo, etapa de *buildup*. Para gerar essa característica, a resistência HZR2 possui um valor elevado no início da falta e diminui gradativamente até um valor próximo a zero. Esse comportamento foi obtido através da equação (2.3), a qual foi implementada no bloco MODELS para controle da HZR2.

$$HZR2 = 10 \cdot R_{falta} \cdot 2,9030970612 \cdot e^{(-0,2731517629 \frac{t-25}{0,8})} \quad (2.3)$$

A figura 2.16 apresenta um exemplo de um sinal de corrente no ponto de falta gerada pelo modelo utilizado nesse trabalho. Nessa figura se pode perceber, a etapa de *buildup* gerada pelo controle da HZR2 entre os instantes 0,22s e 1s. Já na figura 2.17 se pode observar a assimetria característica do arco elétrico e modelada pelo controle da resistência HZR1. Essas figuras mostram que os resultados obtidos

através desse modelo são muito próximos das medições reais apresentadas na literatura técnica e comentadas na subseção 2.2.

O algoritmo completo implementado em MODELS para a modelagem de FAI pode ser visualizado no Apêndice A.

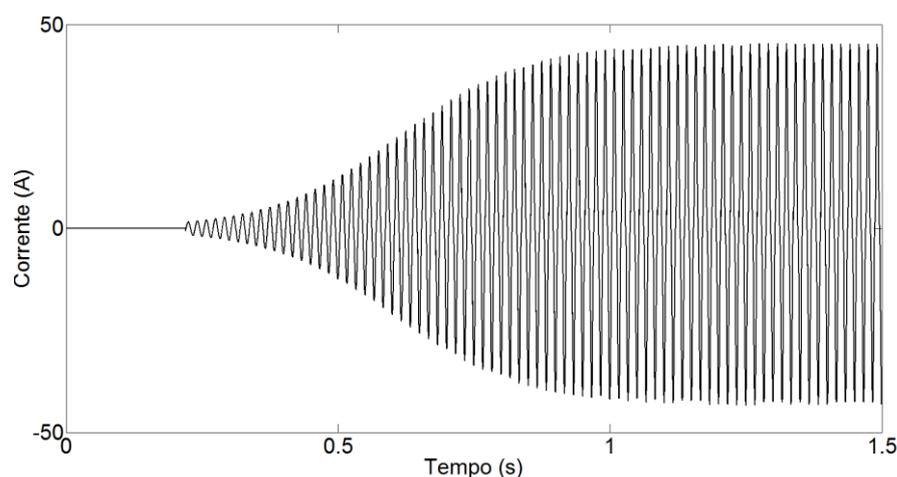


Figura 2.16 - Corrente no ponto de falta

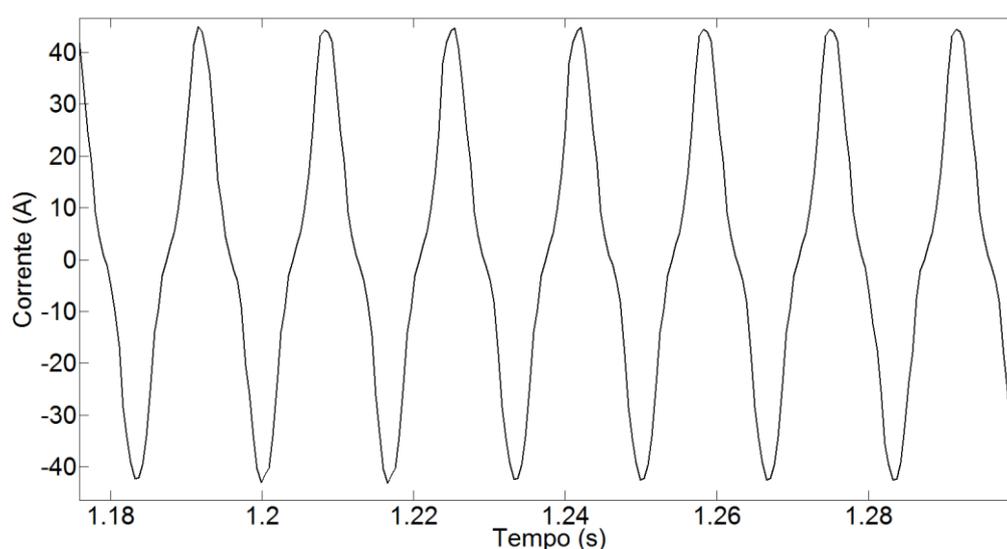


Figura 2.17 - Detalhe da assimetria da corrente no ponto de falta

2.5 Considerações finais

Neste capítulo foi realizada uma descrição das causas geradoras das faltas de alta impedância, sua consequência nos sistemas de distribuição e o risco à população. Também foram apresentadas as características das FAIs e porque esse tipo de falta é difícil de ser detectada com os sistemas de proteção convencionais.

Nesse capítulo, também foram apresentadas diversas técnicas para evitar ou detectar a ocorrência das FAIs. A tendência dessas técnicas mostra que a possível solução para detecção das FAIs está na análise das componentes de alta frequência gerada por esse tipo de falta. Entre as ferramentas matemáticas que realizam essa análise, a transformada wavelet é a que mais se destaca. Essa tendência pode ser parcialmente explicada pelo baixo custo de implementação que as técnicas que utilizam medições já existentes possuem. Por fim, foram apresentados os modelos propostos na literatura para simulação computacional do comportamento das FAI, sendo que foi dada maior ênfase no modelo utilizado por esse trabalho.

O crescente número de trabalhos científicos produzidos mostra que, apesar do problema da FAI ser de simples entendimento e das pesquisas terem evoluído nos últimos anos, ainda não existem soluções para detecção desse tipo de falta que seja totalmente confiável e que possam ser aplicadas em sistemas reais.

3 TÉCNICAS UTILIZADAS NO ALGORITMO PROPOSTO

3.1 Considerações Gerais

A técnica proposta nesse trabalho tem como objetivo detectar faltas de alta impedância de forma a atender a três requisitos básicos associados a qualquer esquema de proteção, isto é, sensibilidade, confiabilidade e velocidade. A sensibilidade diz respeito a detecção de faltas de alta impedância mesmo com correntes muito reduzidas. A confiabilidade ao fato de a técnica não gerar atuações indevidas como as causadas por transitórios normais no sistema (banco de capacitores, correntes de *inrush* e manobras de cargas) e, por fim, a velocidade se refere a eliminação do defeito no menor tempo possível.

Essas características foram alcançadas com base em três ferramentas matemáticas, o Phase-Locked Loop (PLL), a Transformada Wavelet Discreta (TWD) e uma Rede Neural GRNN (Generalized Regression Neural Network). Essas ferramentas apresentam diversas variações e possibilidades de aplicação.

Sendo assim, neste capítulo cada uma dessas ferramentas terá seus fundamentos elucidados, sendo estes direcionados para a maneira como foram utilizadas ao longo do trabalho.

3.2 Phase-Locked Loop (PLL)

O PLL tem sido um importante dispositivo em eletrônica e aplicações de sistemas de potência desde suas primeiras implementações em 1930 por Bellescize. Os primeiros PLLs foram dispositivos analógicos, mas com o desenvolvimento da eletrônica e da tecnologia computacional, o PLL evoluiu para implementações completas em software.

O PLL é um circuito utilizado para sincronizar um sinal de entrada com um sinal de referência no que diz respeito à fase e a frequência. O princípio de funcionamento do PLL pode ser explicado pela estrutura básica mostrada na figura 3.1. O sinal de entrada $u_1(t)$ é comparado com o sinal de referência $u_2(t)$ no detector de fase (DF). A saída do detector de fase é zero enquanto $u_1(t)$ e $u_2(t)$ estão com a mesma fase e frequência. Se a fase ou a frequência do sinal de entrada mudar, a

saída $u_d(t)$ do detector de fase irá desviar de zero. O sinal de erro $u_d(t)$ é passado através de um filtro passa-baixa e depois por um oscilador controlado por tensão (OCT), o qual gera o sinal de referência. Se o sinal de erro desvia de zero, o OCT irá ajustar a frequência do sinal de referência de modo que o sinal de erro se torne zero e os dois sinais estejam em fase. Quando o sinal de entrada está em fase com o sinal de referência, o PLL está no chamado estado bloqueado, por isso o nome phase locked.

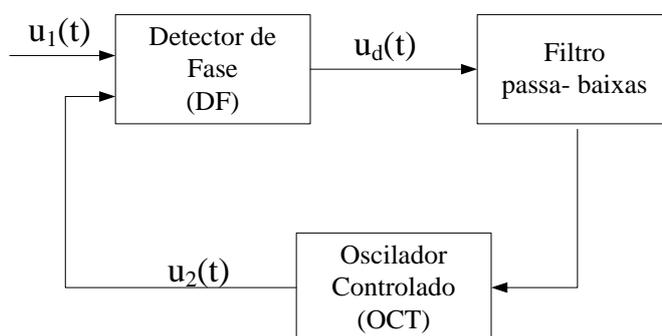


Figura 3.1 - Estrutura básica de funcionamento do PLL

Segundo Ohrstrom (2011), o PLL da figura 3.1 pode ser aplicado a sinais trifásicos se algumas modificações forem realizadas conforme a figura 3.2. Comparando a figura 3.1 com a figura 3.2 o sinal de erro $e(t)$ corresponde à saída do detector de fase $u_d(t)$, enquanto o controlador proporcional e o integrador correspondem ao filtro passa-baixa e ao oscilador controlado por tensão, respectivamente. As entradas do PLL são as três correntes do alimentador medidas na subestação ou em um religador (I_a , I_b e I_c), as quais são primeiramente transformadas nas componentes alfa (I_α) e beta (I_β) através da Transformada Clarke (Clarke, 1943). Então são comparadas com os sinais de referência gerando o sinal de erro $e(t)$.

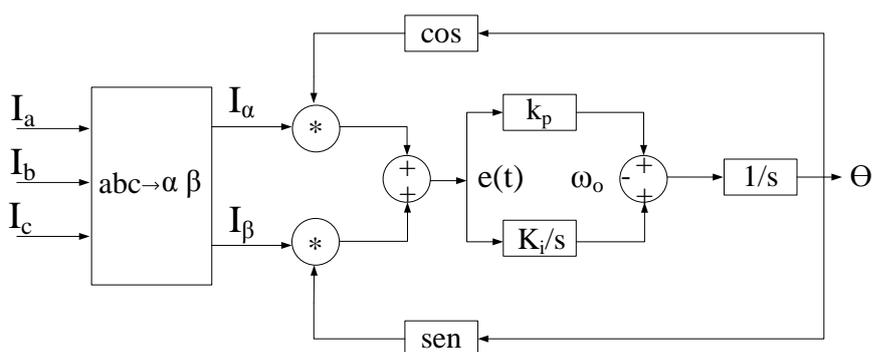


Figura 3.2 - Diagrama de blocos do PLL para uso com sinais trifásicos

Assumindo que o sistema está em regime permanente e equilibrado, as correntes das três fases podem ser escritas como na equação (3.1).

$$\begin{aligned} I_a &= I \cdot \text{sen}(wt) \\ I_b &= I \cdot \text{sen}\left(wt - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \\ I_c &= I \cdot \text{sen}\left(wt + 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

A transformação das coordenadas abc para $\alpha\beta$, Transformada de Clarke, consiste em uma transformação algébrica de um sistema fasorial de tensões ou correntes trifásicas, suposto estacionário, em outro sistema de referência também estacionário, onde as coordenadas não estão a 120° , e sim ortogonais entre si.

A transformação das coordenadas abc para $\alpha\beta$ é dada pela equação (3.2).

$$\begin{bmatrix} I_\alpha(t) \\ I_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Transformando as correntes da equação (3.1) nas componentes de Clarke, através da equação (3.2) e aplicando algumas relações trigonométricas obtém-se a equação (3.3).

$$\begin{aligned} I_\alpha &= \frac{(2 \cdot I_a - (I_b + I_c))}{3} = I \cdot \text{sen}(wt) \\ I_\beta &= \frac{(I_b - I_c)}{\sqrt{3}} = -I \cdot \cos(wt) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Com base na figura 3.2 e nos resultados da equação (3.3), chega-se na equação (3.4) referente ao sinal de erro do PLL.

$$e(t) = I_\alpha \cdot \cos(\theta) + I_\beta \cdot \text{sen}(\theta) = I \cdot \text{sen}(wt - \theta) \quad (3.4)$$

Dessa maneira, o sinal de erro é exatamente zero quando o ângulo θ de saída do PLL está em fase com a corrente da fase 'A'.

Durante o regime normal de funcionamento dos alimentadores o sinal de erro do PLL permanece próximo de zero. Entretanto, quando um transitório ocorre, o sinal de erro irá desviar de zero. Dependendo das características do transitório, o desvio irá ter diferentes magnitudes e frequências. Entretanto, para os transitórios que possuem a mesma origem, os sinais de erro do PLL repetem certas características. Sendo assim, o sinal de erro gerado pelo PLL foi utilizado no algoritmo proposto para extração das assinaturas dos transitórios que são foco desse trabalho. Esse processo será melhor detalhado na subseção 4.3.

3.3 Transformada Wavelet

A wavelet é uma forma de onda com duração limitada que tem um valor médio igual a zero. Comparando wavelets com ondas senoidais, as ondas senoidais não possuem duração limitada, elas se estendem do menos infinito ao mais infinito, são regulares e previsíveis, enquanto as wavelets tendem a ser irregulares e assimétricas. Esse comparativo pode ser melhor compreendido analisando a figura 3.3.

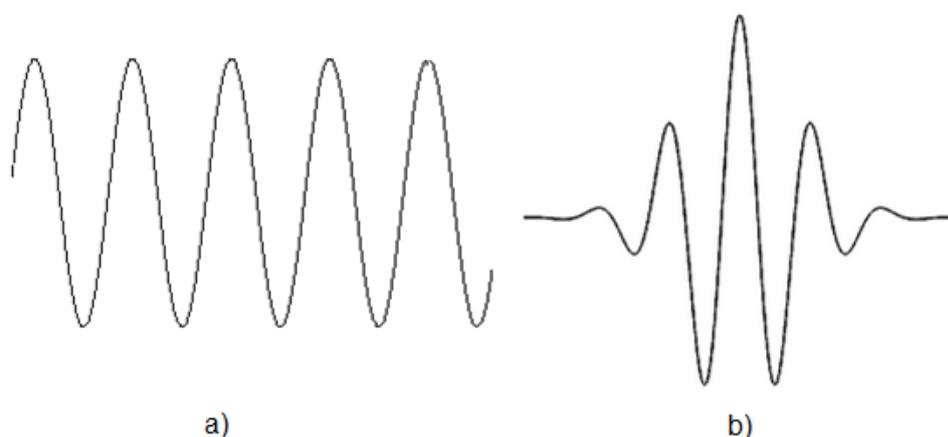


Figura 3.3 - a) Onda senoidal, b) Wavelet (Morlet)

Enquanto a análise de Fourier consiste em decompor o sinal em funções senoidais de varias frequências, a análise via wavelet decompõe o sinal em versões deslocadas e escalonadas da wavelet mãe. Por versão escalonada, entendem-se versões comprimidas e alongadas da função wavelet.

A Transformada Wavelet pode ser dividida basicamente em dois tipos, Transformada Wavelet Contínua (TWC) e Transformada Wavelet Discreta (TWD).

3.3.1 Transformada Wavelet Contínua (TWC)

Matematicamente, o processo da análise de Fourier é representado pela Transformada de Fourier definida pela equação (3.5). Essa transformada é a soma, em todo intervalo de tempo, do sinal $f(t)$ multiplicado por uma função exponencial complexa. O resultado dessa transformação são os coeficientes de Fourier $F(\omega)$, os quais quando multiplicados por um seno de frequência ω , reproduzem as componentes senoidais do sinal original.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.5)$$

De forma similar, a transformada wavelet contínua é definida como a soma, em todo intervalo de tempo, do sinal $f(t)$ multiplicado pelas versões deslocadas e escalonadas da função wavelet mãe Ψ .

Matematicamente a TWC é definida como na equação (3.6) e (3.7).

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \Psi_{a,b}(t) dt \quad (3.6)$$

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.7)$$

Onde o termo “ a ” é o fator de escala, “ b ” o de posição e $\Psi_{a,b}(t)$ é a versão escalonada por “ a ” e deslocada por “ b ” da função wavelet mãe.

Altos fatores de escala tornam a wavelet mãe mais alongada tornando-a melhor na análise de mudanças suaves nos sinais (baixa frequência). De forma contrária, pequenos valores de escala fazem com que a wavelet mãe fique mais comprimida, sendo melhor para analisar mudanças bruscas nos sinais (altas frequências).

Os resultados da TWC são vários coeficientes wavelet, os quais são função do fator de escala e posição. A multiplicação de cada coeficiente pela apropriada versão escalada e deslocada da função wavelet mãe gera as componentes wavelets do sinal original $f(t)$.

3.3.2 Transformada Wavelet Discreta (TWD)

A transformada wavelet contínua é calculada fazendo translações e escalonamentos contínuos de uma função sobre um sinal, calculando uma correlação entre eles. Na prática essa transformada não é muito útil, pois requer infinitas translações e escalonamentos, demandando muito tempo e recurso computacional. As Transformadas Wavelet Discretas foram introduzidas no intuito de proporcionar uma descrição mais eficiente. Elas não são transladadas nem escalonadas continuamente, mas sim em intervalos discretos.

Um eficiente algoritmo para o cálculo da TWD foi proposto por Mallat (1989) e tem como base um banco de filtros. A esse algoritmo se dá o nome de algoritmo piramidal ou de árvore.

Inicialmente, o algoritmo de Mallat (1989) passa o sinal original através de dois filtros, um passa-baixa e outro passa-alta. Em seguida, as saídas desses filtros passam por um processo de subamostragem por um fator de dois. Como resultado do filtro passa baixa e de sua subamostragem, obtemos os chamados coeficientes de aproximação c_1 , onde 1 se refere a primeira filtragem (nível 1 ou escala 1). Esses coeficientes são referentes às altas escalas o que, conforme a TWC, representa as baixas frequências do sinal original. Do filtro passa-alta, obtemos os coeficientes de detalhe d_1 que se referem às baixas escalas e representam as componentes de alta frequência do sinal.

Como consequência do teorema de amostragem de Nyquist apresentado por Oppenheim (1989), um sinal com frequência de amostragem f_s , possui um espectro de frequência de 0 a $f_s/2$ Hz. Os filtros digitais utilizados no algoritmo piramidal dividem o espectro de frequências do sinal de entrada pela metade. Portanto, os coeficientes de aproximação do primeiro nível possuem espectro de frequência variando de 0 a $f_s/4$, conteúdo de mais baixa frequência do sinal, enquanto que os coeficientes de detalhe, possuem banda de passagem de $f_s/4$ a $f_s/2$ Hz. Sendo

assim, pode-se concluir que os coeficientes de aproximação e detalhe também possuem faixa de frequências em função de f_s .

Os coeficientes de aproximação do primeiro nível podem, novamente, ser passados através de dois filtros e decompostos em mais duas componentes c_2 e d_2 , e assim por diante até um nível máximo que será calculado posteriormente nesse trabalho. Essa decomposição iterativa é chamada de análise multiresolucional e permite analisar um determinado sinal em diferentes espectros de frequência no tempo. Esse tipo de análise multiresolucional é muito utilizada no estudo de sinais não estacionários, pois permite uma visualização que relaciona instante de tempo e frequência, como será visto a seguir.

O espectro de frequência dos coeficientes de aproximação e detalhe em um nível j pode ser calculado conforme as equações (3.8) e (3.9), respectivamente.

$$\left[0, \frac{f_s}{2^{j+1}} \right] \quad (3.8)$$

$$\left[\frac{f_s}{2^{j+1}}, \frac{f_s}{2^j} \right] \quad (3.9)$$

A estrutura do algoritmo piramidal proposto por Mallat (1989) pode ser melhor compreendida através da análise da figura 3.4. Nessa figura, pode-se perceber que o espectro de frequência dos coeficientes de aproximação e detalhe varia conforme se muda o nível de análise. A figura 3.4 também mostra que, conforme o nível de resolução aumenta, o número de amostras (N) dos coeficientes de aproximação e detalhe diminui pela metade (processo de subamostragem).

O sinal original pode ser decomposto em termos dos coeficientes de detalhe e aproximação nos diversos níveis de resolução até um nível máximo J_{max} . Esse número máximo de níveis tem relação com o número de amostras do sinal original (N_s), que por sua vez, deve ser uma potência de dois. Essa relação pode ser calculada através da equação (3.10).

$$N_s = 2^{J_{max}} \quad (3.10)$$

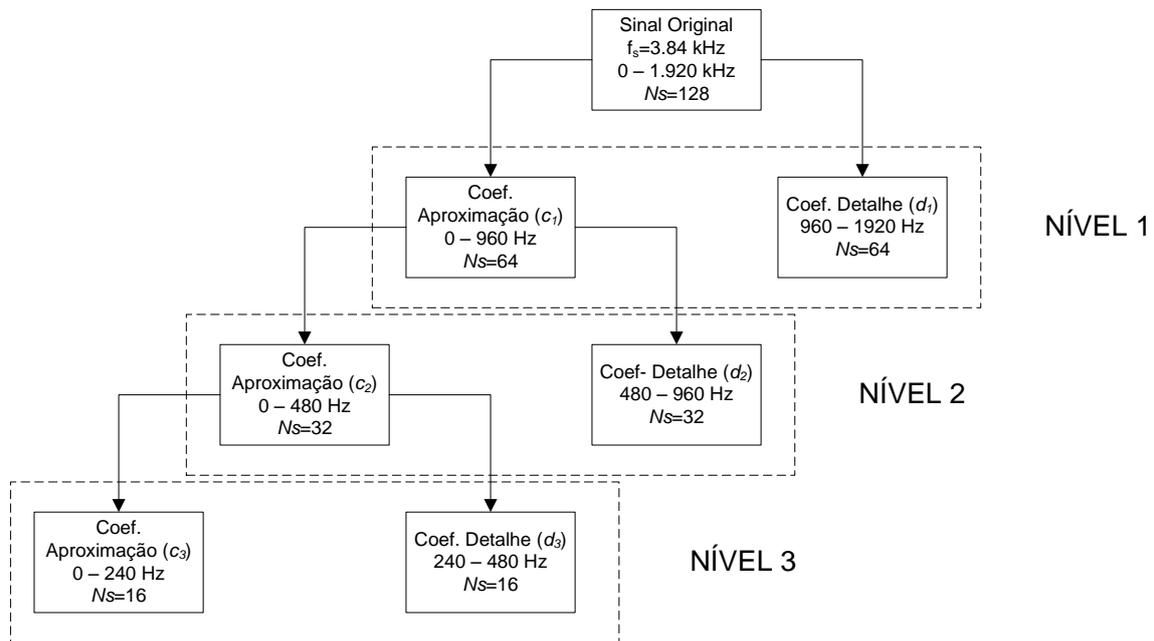


Figura 3.4 - Estrutura da análise multiresolucional da TWD

Uma maneira simples de calcular os coeficientes de aproximação (c_1) e detalhe (d_1) do primeiro nível é proposta por Costa (2010). Esse faz uso das equações (3.11) e (3.12) para o cálculo dos coeficientes.

$$c_1 = A_1 \begin{bmatrix} S(1) \\ S(2) \\ \vdots \\ S(N_s - 1) \\ S(N_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(1) \\ c_1(2) \\ c_1(3) \\ \vdots \\ c_1(N_s / 2) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$d_1 = B_1 \begin{bmatrix} S(1) \\ S(2) \\ \vdots \\ S(N_s - 1) \\ S(N_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1(1) \\ d_1(2) \\ d_1(3) \\ \vdots \\ d_1(N_s / 2) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

O sinal S é um sinal qualquer de qual se deseja extrair os coeficientes; A_1 e B_1 são matrizes de ordem $(N_s/2) \times N_s$, formada pelos coeficientes dos filtros passa-

baixa e passa-alta, respectivamente. Os valores desses coeficientes dependem da wavelet mãe utilizada.

Existem inúmeras funções que podem ser eleitas wavelet mãe, devido a esse grande número, nesse trabalho será abordado apenas a wavelet mãe de *Daubechies 4 (db4)* que foi utilizada no algoritmo proposto, entretanto outras podem ser visualizadas em Oliveira (2007).

Dessa maneira, para a *Daubechies 4 (db4)*, a matriz A_1 e B_1 são definidas conforme (3.13) e (3.14). Essa wavelet mãe foi escolhida, pois entre as cinco que foram testadas (COIF4, DMEY, SYM3, DB7 e DB4), ela apresentou os resultados mais promissores.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0,224 & -0,129 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0,483 & 0,836 \\ 0,483 & 0,836 & 0,224 & -0,129 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,483 & 0,836 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0,483 & 0,836 & 0,224 & -0,129 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0,836 & -0,483 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -0,129 & -0,224 \\ -0,129 & -0,224 & 0,836 & -0,483 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,129 & -0,224 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -0,129 & -0,224 & 0,836 & -0,483 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Nesse trabalho apenas os coeficientes de detalhe do primeiro nível serão utilizados, pois são nesses que as componentes de mais alta frequência estão presentes. Entretanto, para encontrar os coeficientes e aproximações dos outros níveis, basta ajustar o tamanho das matrizes A_1 e B_1 , de tal maneira que o número de colunas dessas matrizes sejam iguais ao número de amostras do nível anterior.

Em aplicações em tempo real o número de amostras que chegam para serem processadas por um determinado algoritmo, depois de decorrido certo tempo, pode ser muito elevado. Esse número de amostras depende diretamente da frequência de amostragem do sinal e do tempo decorrido. Por exemplo, um sinal com frequência de amostragem de 3,84 kHz, após uma hora, irá ter disponibilizado mais de treze milhões de amostras para o algoritmo. Sendo assim, seria inviável armazenar todas

essas amostras e a carga computacional para calcular os coeficientes de detalhe seria muito elevada. Para solucionar esse problema, é utilizada uma janela de dados “deslizante” que possui um número fixo de amostras, por exemplo, 128. O termo “deslizante” se deve ao fato de que a janela “desliza” sobre o sinal para que ela seja formada sempre pelas últimas 128 amostras. A figura 3.5 demonstra esse comportamento de janela deslizante para uma janela de quatro amostras.

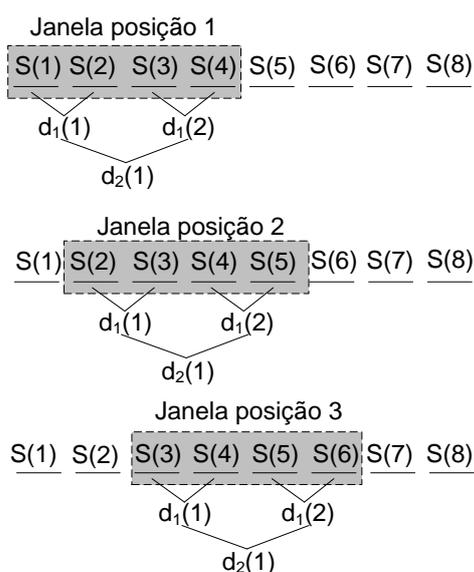


Figura 3.5 - Janela de dados deslizante e coeficientes de detalhe no primeiro e segundo nível.

Devido ao fato da janela de dados ser móvel e seus valores mudarem a cada instante de tempo, os coeficientes de detalhe e aproximação da TWD também precisam ser recalculados. Assim, para cada janela de dados com, por exemplo, 128 amostras se obterão 64 coeficientes de detalhe e 64 de aproximação, no primeiro nível. Caso se queira realizar uma análise dos coeficientes de detalhe do primeiro nível das últimas três janelas resultarão em 196 coeficientes. Esses coeficientes, quando agrupados e analisados em relação ao tempo em que ocorreram irão se sobrepor em alguns pontos, podendo gerar interpretações errôneas. Sendo assim, para facilitar a análise dos coeficientes de detalhe em relação ao instante de tempo que ocorreram uma nova forma de visualização chamada sinal de detalhe é utilizada.

O sinal de detalhe de cada nível é formado sempre pela última amostra de cada janela de coeficientes de detalhe calculados. No exemplo da figura 3.5 o sinal de detalhe do nível 1 seria formado por todos $d_1(2)$, onde cada um deles seria

referido ao tempo médio entre as amostras que lhe deram origem. Por exemplo, para a janela na posição 1, se a amostra $S(3)$ ocorreu no instante 2 segundos e a $S(4)$ no instante 3 segundos, então se considera que o detalhe $d_1(2)$ ocorre em 2,5 segundos. Assim, consegue-se analisar o instante em que ocorreu um determinado coeficiente de detalhe.

Devido a essa maior facilidade de análise através do sinal de detalhe, a partir deste ponto quando for citado d_1, d_2, \dots, d_j entende-se por sinal de detalhe no respectivo nível 1, 2 ...,j.

Na técnica proposta por esse trabalho, a TWD foi aplicada ao sinal de erro do PLL para extração dos coeficientes e do sinal de detalhe do primeiro nível. O sinal de detalhe foi utilizado para detectar a ocorrência dos transitórios, enquanto os coeficientes de detalhe do transitório foram utilizados como entrada em uma rede neural que irá classificar o transitório. Essa etapa da técnica proposta será melhor detalhada na subseção 4.4 e 4.5.

3.4 Rede Neural de Regressão Generalizada

A Rede Neural de Regressão Generalizada, conhecida na literatura inglesa como Generalized Regression Neural Networks (GRNN) foi proposta inicialmente por Specht (1991) e é uma variação da rede de base radial apresentada na figura 3.6.

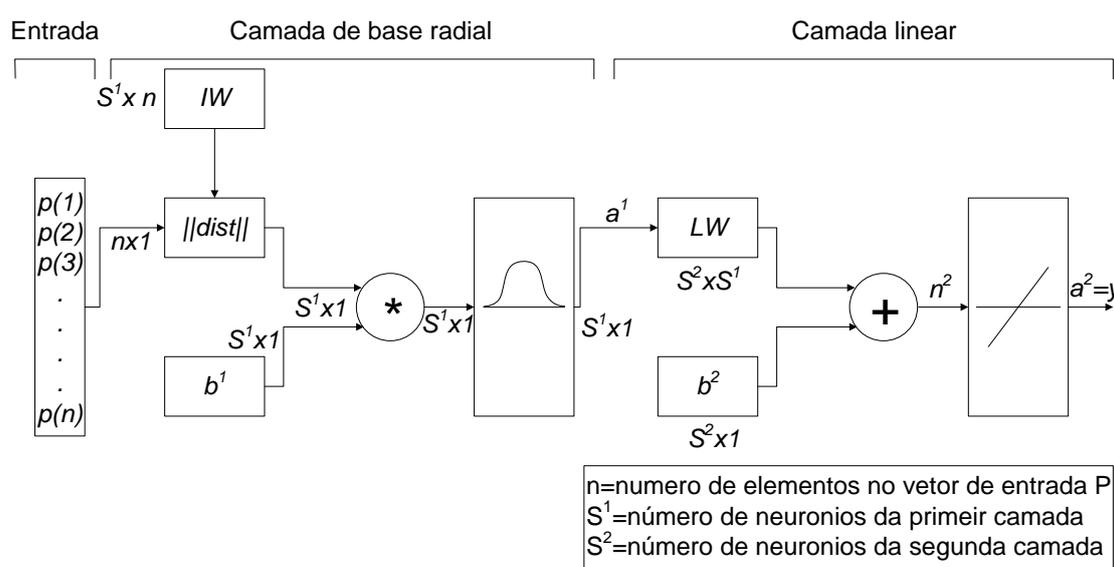


Figura 3.6 - Rede de base radial

As redes de base radial são redes que utilizam funções de base radial como função de ativação. Essas apresentam duas camadas, uma camada oculta de base radial e outra linear. A primeira camada possui um bloco chamado $||dist||$ que calcula a distância, geralmente euclidiana, entre o vetor p de entrada, e a matriz IW de pesos. A saída do bloco $||dist||$ é multiplicada pelo *bias* b^1 e o seu resultado é utilizado como entrada em uma função de ativação não linear de base radial. Normalmente a função utilizada é uma exponencial conforme a equação (3.15). Essa função pode ser vista de forma gráfica na figura 3.7.

$$a^1 = e^{-n^2} \quad (3.15)$$

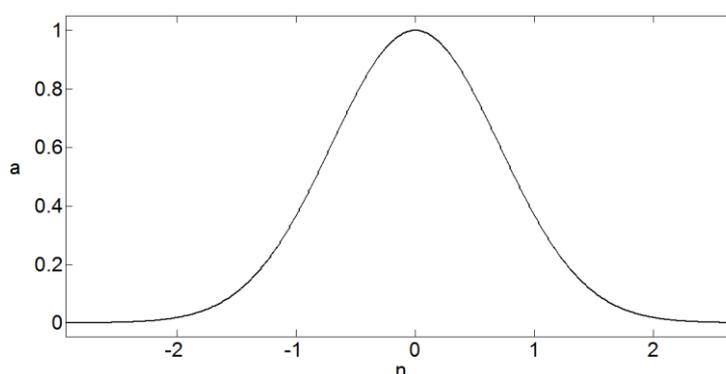


Figura 3.7 - Função de ativação não linear

Essa função tem um valor máximo igual a 1 quando sua entrada é zero. Conforme a distancia entre p e IW aumenta seu valor vai se aproximando de zero. Sendo assim, o neurônio de base radial atua como um detector que tem como saída o valor 1 quando o vetor de entrada p é exatamente igual a matriz de pesos IW .

Na segunda camada, o vetor de saída a^1 da função de ativação não linear é multiplicado pela matriz de pesos LW e seu resultado somado ao *bias* b^2 . O vetor n^2 , de saída do bloco de soma, é utilizado como entrada de uma função de ativação linear. Essa função disponibiliza em sua saída o vetor a^2 que é exatamente igual a entrada n^2 , entretanto essa função é necessária por questões estruturais da rede.

O *bias* b^1 permite ajustar a sensibilidade da função de ativação. Por exemplo, se um neurônio tem um *bias* de 0,1 ele terá o valor 0,5 em sua saída para qualquer vetor p de entrada a uma distancia de 8,326 ($n=||8,326||.b$) do vetor peso. O *bias* b^2 é calculado com base na saída a^1 da primeira camada e na matriz de pesos LW , a qual é formada pelos índices que identificam cada entrada utilizada no treinamento

da rede. Conhecendo-se a^1 e LW e sabendo que a camada é linear, pode-se encontrar b^2 tal que a soma do erro quadrático seja mínima.

A arquitetura da rede GRNN é muito similar a da rede de base radial, a única diferença existe na segunda camada como pode ser visto na figura 3.8. Na GRNN a saída da função de ativação da primeira camada (a^1) entra no bloco *nprod*. Esse bloco faz o produto ponto a ponto de cada linha da matriz de pesos LW com o vetor de entrada a^1 , além disso, normaliza todos os resultados com a soma dos elementos de a^1 . A saída desse bloco passa por uma função de ativação linear e gera em sua saída a^2 , assim como na rede de base radial.

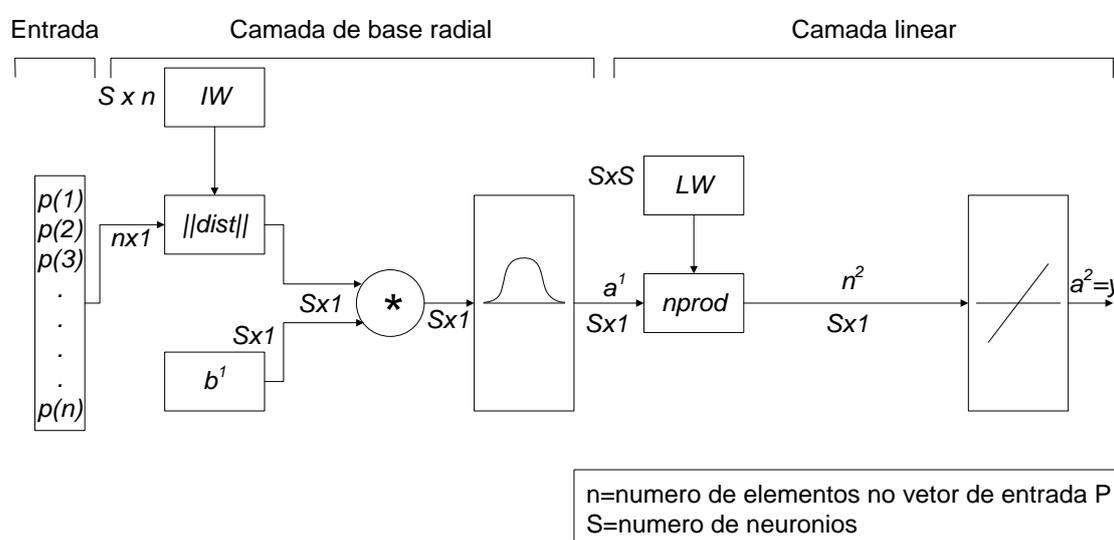


Figura 3.8 - Diagrama de blocos da GRNN

A primeira camada é exatamente igual a da rede de base radial. O número de neurônios é igual ao número de entradas do vetor P . Os pesos da primeira camada são definidos como a matriz transposta do vetor de entrada, aqui definido como P' . O *bias* b^1 é definido como um vetor coluna de $0,8326/spread$, onde *spread* é um valor definido pelo usuário para ajuste da sensibilidade da GRNN e está relacionado com a diferença entre os sinais utilizados no treinamento. Como já mencionado nesse capítulo, o valor 0,8326 é utilizado para que, se a distância entre o vetor de entrada e seu vetor peso for igual ao *spread*, então a saída do neurônio a^1 será aproximadamente 0,5.

Um valor de *spread* alto faz com que GRNN se torne mais generalista, ou seja, para uma certa entrada, vários neurônios podem ser ativados. De forma contrária, um *spread* de valor reduzido, próximo a zero, faz com que a rede se torne

mais específica, ativando apenas o neurônio com pesos exatamente iguais a entrada. Por exemplo, supondo que a distância calculada pelo bloco $\|dist\|$, para um caso hipotético, seja igual a 0,5. Com um *spread* igual a 0,1 a saída do neurônio da primeira camada (a^1) será:

$$\begin{aligned} \text{bias} &= \frac{0,8326}{\text{SPREAD}} = 8,326 \\ n &= \|dist\| \cdot \text{bias} = 10 \cdot 8,326 = 83,26 \\ a^1 &= e^{-n^2} \cong \text{zero} \end{aligned}$$

De forma análoga, para um *spread* igual a 15, a saída do neurônio da primeira camada (a^1) será aproximadamente 1. Logo, um *spread* baixo, faz com que um neurônio seja ativado ($a^1 \cong 1$) apenas para sinais de entrada muito parecidos ($\|dist\| \cong 0$) com os utilizados no treinamento, o que torna a rede pouco generalista. De forma contrária, um *spread* alto faz com que um neurônio seja ativado mesmo para sinais não muito próximos aos utilizados no treinamento. Isso pode fazer com que a rede classifique erroneamente alguns sinais. O ajuste do *spread* é realizado de maneira experimental e nesse trabalho foi ajustado em 3,5.

A segunda camada também tem um número de neurônios igual ao número de vetores de entrada P , entretanto, nessa camada, a matriz de pesos LW é definida com os índices que identificam cada entrada utilizada no treinamento da rede.

Na técnica proposta por este trabalho, a GRNN é utilizada para classificar os transitórios que são foco desse trabalho. Para isso, a rede foi previamente treinada com os coeficientes de detalhe do primeiro nível das assinaturas desses transitórios. Esta etapa da técnica proposta será melhor detalhada na subseção 4.5.

3.5 Considerações Finais

O presente capítulo apresentou as três ferramentas matemáticas utilizadas no algoritmo proposto nesse trabalho. Essas ferramentas apesar de serem consagradas na literatura técnica, geralmente não possuem seus fundamentos abordados em detalhes. Dessa maneira, esse capítulo teve como objetivo além de citar as ferramentas, também detalhar seu princípio de funcionamento e mostrar a relativa simplicidade de sua aplicação.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 Considerações Gerais

Nesse capítulo será apresentado um novo algoritmo para detecção de faltas de alta impedância e classificação de transitórios em redes de distribuição. Esse algoritmo possui como principal vantagem a não necessidade de instalação de equipamentos adicionais na rede de distribuição, pois utiliza apenas informações de corrente já obtidas pelos relés das subestações ou religadores. Além disso, a metodologia proposta é imune a eventuais transitórios elétricos gerados no sistema, como chaveamento de banco de capacitores, energização de transformadores e entradas e saídas de cargas.

4.2 Fluxograma

A estrutura do algoritmo proposto nesse trabalho para detecção de FAI e classificação de transitórios pode ser vista no fluxograma da figura 4.1. De forma simplificada, o algoritmo proposto funciona da seguinte maneira: os dados de entrada do algoritmo são as três correntes das fases do alimentador que está sendo monitorado. Essas correntes entram no bloco PLL que tem como saída o seu sinal de erro. Esse sinal de erro é utilizado como entrada no bloco TWD que extrai os coeficientes de detalhe do primeiro nível e forma o sinal de detalhe do primeiro nível ($d_1(n)$). O sinal de detalhe é então utilizado, no bloco DETECT, para detectar a ocorrência de um transitório. Caso seja detectado um transitório, os coeficientes de detalhe do primeiro nível, extraídos do sinal de erro do PLL, durante o transitório, são utilizados como entrada no bloco GRNN que classifica o transitório como chaveamento de banco de capacitores, energização de transformadores ou FAI. Caso o transitório seja classificado com FAI, a condição adicional do bloco CARGA é testada para definir se o transitório é realmente uma FAI ou é uma saída de carga.

No decorrer desse capítulo, será descrita a estrutura interna e a função de cada bloco que integra o fluxograma do algoritmo proposto.

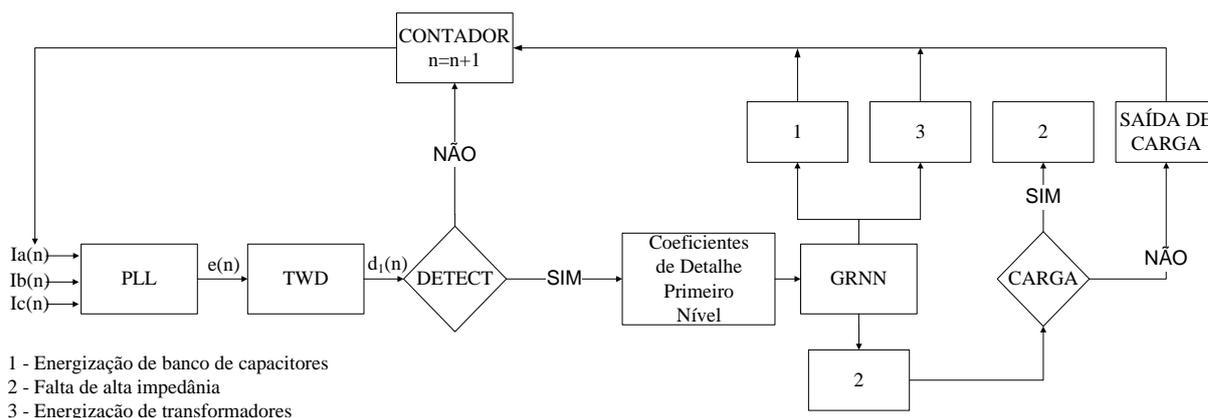


Figura 4.1 - Fluxograma do algoritmo proposto

4.3 Obtenção de Padrões Através do PLL

O algoritmo proposto nesse trabalho se fundamenta na detecção de um transitório e a identificação de qual equipamento ou manobra que o originou. Essa classificação é realizada com base na comparação das características do transitório detectado com as assinaturas, previamente armazenadas, de cada tipo de transitório. Entretanto, para que essa classificação seja correta, as características armazenadas devem ser universais, ou seja, devem se comportar como a assinatura de cada transitório de tal maneira que essa assinatura seja independente das variáveis do que gerou o transitório, como potência do equipamento, resistência de falta ou posição no alimentador. Uma maneira de extrair essas assinaturas foi verificada em Ohrstrom (2011) e utiliza o sinal de erro do PLL.

Durante o regime normal de funcionamento dos alimentadores o sinal de erro do PLL permanece próximo de zero. Entretanto, quando um transitório ocorre, o sinal de erro irá desviar de zero. Dependendo das características do transitório, o desvio irá ter diferentes magnitudes e frequências. Entretanto, para os transitórios que possuem a mesma origem, os sinais de erro do PLL são similares. Por exemplo, o desvio causado nos sinais de erro do PLL durante a energização de um transformador (inrush) mantém certa semelhança, independentemente da potência do equipamento. O mesmo vale para chaveamento de banco de capacitores ou manobra de cargas.

Na ocorrência de transitórios causados pelas FAIs, os sinais de erro do PLL também são semelhantes, independente da impedância da falta ou do lado em que ela ocorre, lado carga ou lado fonte. A posição no alimentador em que esses

transitórios ocorrem também não interfere significativamente nas características do sinal de erro do PLL.

Sendo assim, essa funcionalidade do sinal de erro gerado pelo PLL foi utilizada no algoritmo proposto para extração das características das FAIs e dos transitórios normais. Essas características são importantes para que se possam diferenciar esses transitórios quando ocorrerem nos alimentadores. Entende-se por transitórios normais, aqueles que ocorrem de forma programada ou que a concessionária tenha conhecimento prévio de sua ocorrência como, por exemplo, energização de transformadores, chaveamento de banco de capacitores, entrada e saída de ramais.

A figura 4.2 apresenta o sinal de erro do PLL para FAI e também para outros transitórios que são foco do algoritmo proposto. Esses sinais de erro foram extraídos das correntes das três fases do alimentador em que ocorreu o transitário. Sendo que esses valores de corrente foram obtidos através de medições na subestação. A FAI e os outros transitórios foram simulados no sistema teste apresentado na figura 4.3. Os dados desse alimentador serão descritos em detalhes no Capítulo 5.

Através da figura 4.2, pode-se notar que independente da impedância de falta, do instante ou da posição em que essa ocorre, os sinais de erro do PLL são semelhantes quando se trata de FAIs. O mesmo resultado pode ser visto para os outros tipos de transitórios, ou seja, independente da potência do capacitor, transformador, carga ou posição em que ocorrem no alimentador, os sinais de erro do PLL também são semelhantes quando o transitário possui a mesma origem.

Ainda vale salientar que as características do alimentador como, tipo de estruturas e diâmetro dos condutores, também não interferem significativamente no sinal de erro do PLL. Assim, as assinaturas extraídas dos transitórios e apresentadas na figura 4.2 podem ser utilizadas para identifica-los em qualquer alimentador.

No algoritmo proposto nesse trabalho, o PLL é utilizado em duas etapas. Na primeira situação, o PLL é aplicado sobre os sinais de corrente do alimentador durante a ocorrência dos transitórios para extração de suas assinaturas. Essas assinaturas serão utilizadas no processo de treinamento de uma rede neural, conforme será visto na subseção 4.5. Na segunda etapa, depois de realizado o treinamento da rede, o PLL passa a ser aplicado em tempo real nos sinais de corrente do alimentador, conforme o bloco PLL do fluxograma da figura 4.1.

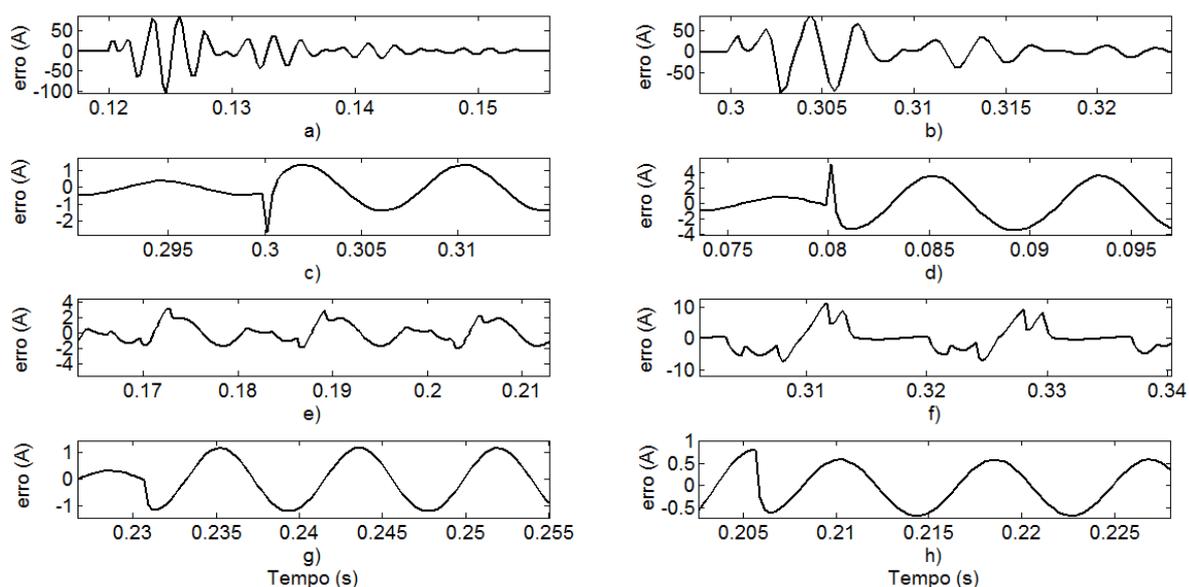


Figura 4.2 - Sinal de erro do PLL para: a) energização de banco de capacitores de 600 kVAR a 5km da SE, b) energização de banco de capacitores de 900 kVAR a 12km da SE, c) falta de alta impedância (250Ω) do lado da carga a 5km da SE, d) falta de alta impedância (350Ω) do lado da fonte a 15km da SE, e) energização de transformador de 75 kVA a 7km da SE, f) energização de transformador de 300 kVA a 12km da SE, g) saída de carga, a 5km da SE, referente a perda de uma fase de um ramal com três transformadores de 75 kVA, h) saída de carga, a 17km da SE, referente a abertura de um ramal monofásico com cinco transformadores monofásicos de 25 kVA.

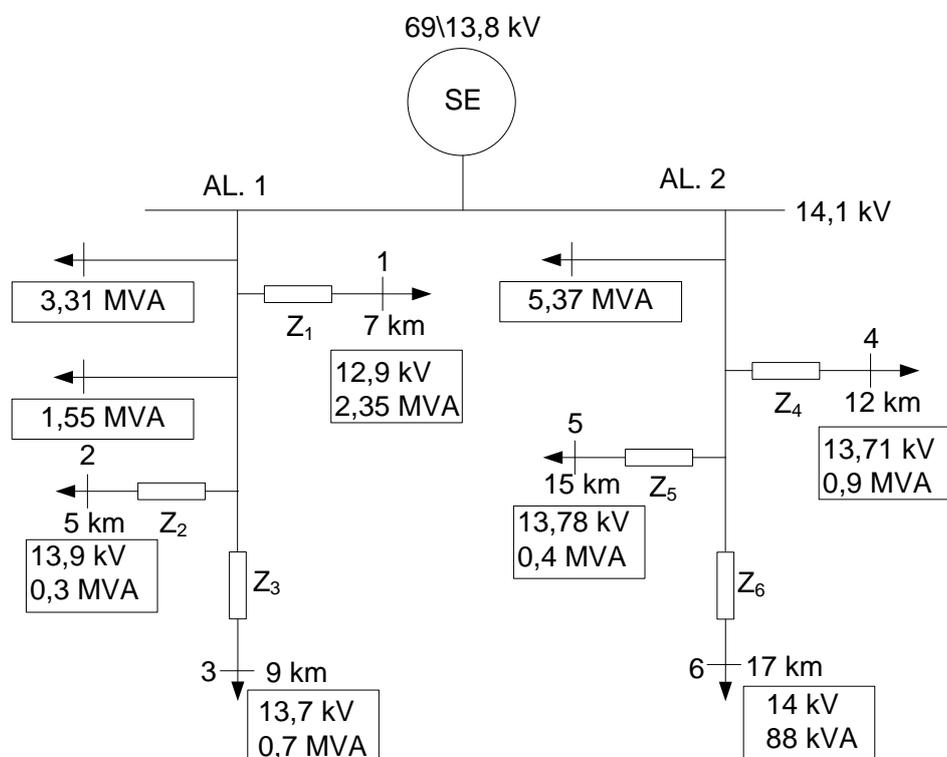


Figura 4.3 - Sistema teste utilizado para análise do sinal de erro do PLL para diversos tipos de transitórios

4.4 Detecção de Transitórios

A ocorrência das FAIs é acompanhada pelo surgimento, nos sinais de corrente, de componentes de frequência diferentes da fundamental. Essas componentes não são estacionárias e devido a essa característica, algumas ferramentas tradicionais, como a Transformada de Fourier, não são eficientes na análise dos sinais gerados pelas FAIs, pois perdem informações de tempo na sua aplicação. Para esse tipo de sinal, a Transformada Wavelet (TW) apresenta vantagens.

A análise multiresolucional da TWD é útil quando se necessita analisar sinais não estacionários em diversos espectros de frequência. No que diz respeito a detecção de transitórios, o sinal de detalhe no nível 1 é o mais adequado. Isso se deve ao fato de serem nesse nível que as componentes de mais alta frequência estão presentes.

A escolha do sinal de detalhe do nível 1 (d_1) da TWD para detecção de transitórios pode ser melhor compreendida através da decomposição multiresolucional apresentada na figura 4.4. Nessa figura, pode-se perceber que no instante em que ocorre o transitório (amostra 1155), o sinal de detalhe do primeiro nível sofre uma variação abrupta e logo volta para uma posição próxima a zero, essa característica pode ser facilmente detectada com a elaboração de um algoritmo simples que será descrito posteriormente nesse trabalho.

O transitório da figura 4.4 foi simulado no sistema teste da figura 3.3 e é referente à corrente na fase “A”, medida na subestação, durante o chaveamento de um banco de capacitores de 600 kVAr, instalado a 5 km da subestação.

A função de detecção de transitórios, a partir do sinal de detalhe no nível 1 da TWD é utilizada no algoritmo proposto nesse trabalho (bloco TWD do fluxograma da figura 4.1). Entretanto, ao contrario do exemplo da figura 4.4 em que a TWD é aplicada diretamente no sinal de corrente, no algoritmo proposto, o sinal de detalhe no nível 1 é extraído do sinal de erro do PLL. Essa diferença ocorre pela maior facilidade em desenvolver um algoritmo de detecção para monitorar apenas um sinal de detalhe, caso da TWD aplicada ao sinal de erro do PLL, do que um algoritmo para monitorar três sinais de detalhe, o que ocorre se a TWD for aplicada aos sinais de corrente das três fases.

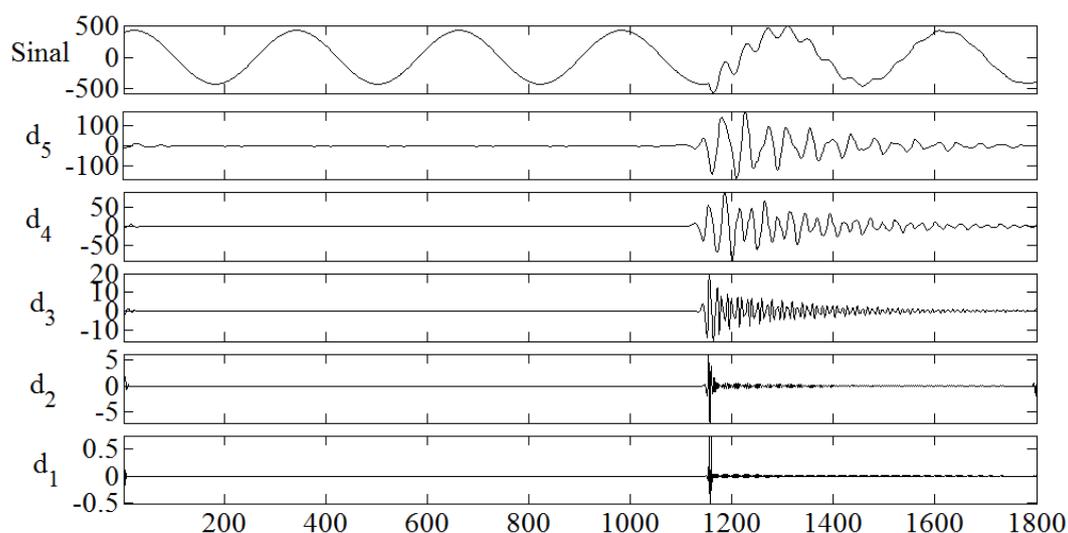


Figura 4.4 - Sinal de detalhe nos cinco primeiros níveis de decomposição

No instante em que ocorre um transitório nos sinais de corrente do alimentador, ocorre um desvio abrupto no sinal de detalhe do nível 1 da TWD. Para detectar esse desvio em d_1 diversas técnicas são propostas na literatura, entretanto a grande maioria utiliza um valor de disparo pré-definido, aqui chamado de th . Esse valor, geralmente, é encontrado de forma experimental, ou seja, através da realização de diversas simulações até que um determinado valor atue adequadamente para a maioria dos testes realizados. Entretanto, esse procedimento é exaustivo e o valor encontrado para th pode não funcionar corretamente para sinais diferentes daqueles utilizados para validá-lo.

O algoritmo para detecção de transitórios implementado no bloco DETECT do fluxograma da figura 4.1, não utiliza um valor de $th_{\text{pré-definido}}$, mas sim um valor que se ajusta automaticamente durante o monitoramento de d_1 . O algoritmo de detecção fundamenta-se em um conceito estatístico chamado de Curva Normal. Essa curva foi proposta inicialmente por Moivre (1730) e após ser utilizada para análise de dados astronômicos em 1809 por Gauss, passou a também ser chamada de distribuição de Gauss. Uma curva normal caracteriza-se pelo fato de que 68,26% das amostras de certa população se concentram em valores que se situam no intervalo entre um desvio padrão acima e um desvio padrão abaixo da média. Esse valor sobe para 95,44% quando se considera dois desvios padrões, acima e abaixo da média, e 99,74% quando se considera três desvios padrões. As amostras que se situam fora desses intervalos são chamadas de “anormais”, ou seja, estão muito fora do padrão normal da população. Por população se entende um conjunto de dados

qualquer que se deseja analisar. A figura 4.5 representa graficamente uma curva normal, onde μ é a média e σ o desvio padrão.

Segundo Pasquali [2006], a curva normal pode ser utilizada para qualquer população, desde que se tenha um número elevado de dados. Um número de dados igual a trinta já é considerado elevado se a distribuição das amostras está próxima da sua média. Conforme a distribuição se afasta da média, um maior número de dados é necessário.

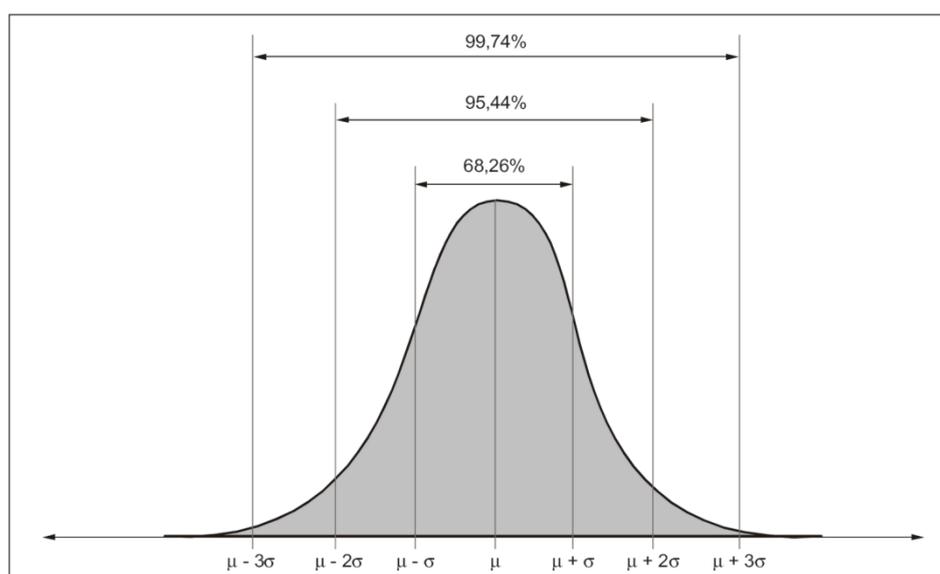


Figura 4.5 - Curva normal

Fonte: <http://mathluiz.blogspot.com.br/2010/12/questao-80-prova-do-estado-ofa-2011.html>

Como pode ser visto na figura 4.4, os dados do sinal de detalhe no nível 1 da TWD podem ser analisados pela conceito da curva normal, pois o valor das suas amostras, durante o regime normal de funcionamento do alimentador, estão próximos do seu valor médio. Sendo assim, na metodologia do algoritmo proposto para detecção de transitórios, a cada instante de tempo é calculado o valor médio e o desvio padrão da janela de dados atual composta pelas últimas 128 amostras de d_1 . Após isso, o algoritmo analisa se a última amostra da janela está entre a média mais três desvios padrão (th_1) e a média menos três desvios padrão (th_2), ou seja, se a última amostra respeita os 99,72% definidos pela curva normal. Caso essa última amostra respeite os 99,72% o algoritmo aguarda uma próxima amostra (bloco CONTADOR do fluxograma da figura 4.1 é incrementado) e calcula novamente a média e o desvio padrão, só que agora para a nova janela de dados. Após isso, o

algoritmo faz a mesma comparação que foi feita para a amostra anterior, ou seja, verifica se essa ultima amostra respeita os 99,72% da curva normal. Caso respeite, o procedimento é repetido indefinidamente, até o momento que uma última amostra da janela de dados esteja fora desse intervalo o que a define como “anormal” e, nesse algoritmo, caracteriza o inicio de um transitório.

O algoritmo para detecção de transitório é apresentado no fluxograma da figura 4.6 onde μ é a média, σ o desvio padrão e n é a amostra atual da janela de dados. Essas variáveis são calculadas conforme as equações (4.1) e (4.2), respectivamente. Analisando as equações para o cálculo da média e desvio padrão e também o fluxograma da figura 4.6, pode-se perceber que, ao contrario de outras técnicas de detecção, o algoritmo proposto nesse trabalho não utiliza um th pré-definido para a atuação do detector, mas sim um th adaptativo que é calculado com base nos dados do próprio sinal que está sendo analisado. Sendo assim, esse algoritmo pode ser utilizado em qualquer sinal em que se possa utilizar a curva normal, sem precisar ser reajustado.

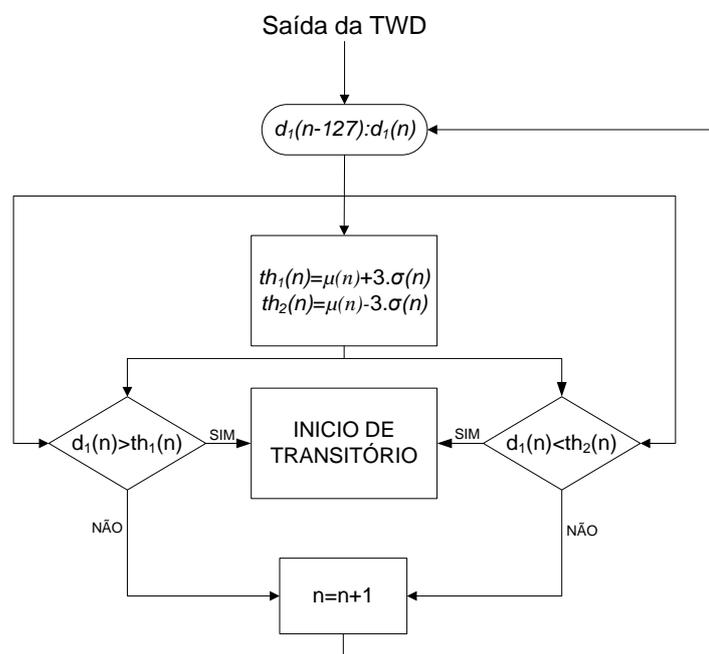


Figura 4.6 - Fluxograma do método de detecção de transitórios

$$\mu(n) = \frac{d_1(n-127) + d_1(n-126) \dots + d_1(n)}{128} \quad (4.1)$$

$$\sigma(n) = \sqrt{\frac{1}{127} \cdot \sum_{j=1}^{128} (d_{1_j} - \mu)^2} \quad (4.2)$$

4.5 Classificação de Transitórios

Nesse trabalho, a rede GRNN foi implementada no bloco GRNN do fluxograma da figura 4.1 e é utilizada para identificar a ocorrência de FAIs e classificar outros tipos de transitórios que ocorrem em redes de distribuição de energia elétrica.

Para realizar essa tarefa a rede é previamente treinada com os coeficientes de detalhe do primeiro nível das assinaturas desses transitórios. Como visto no item 4.3, essas assinaturas foram extraídas do sinal de erro do PLL no momento da ocorrência de uma FAI ou outro tipo de transitório e são armazenadas em janelas com 128 amostras em uma frequência de amostragem de 3,84 kHz. O fato do sinal de erro do PLL não ser utilizado diretamente no treinamento da rede se deve a que, os transitórios são melhores diferenciados através de suas componentes de alta frequência e essas podem ser extraídas do sinal através dos coeficientes de detalhe do primeiro nível da TWD.

Para o treinamento da rede, foram utilizadas assinaturas das FAI, chaveamento de banco de capacitores e energização de transformadores. A figura 4.7 apresenta os coeficientes de detalhe de alguns dos transitórios utilizados no processo de treinamento da rede. O número de coeficientes de detalhe no primeiro nível, é a metade do número de amostras do sinal original, ou seja, para a janela de 128 amostras, no primeiro nível, tem-se 64 amostras, como pode ser visto na figura 4.7.

Para geração dos sinais desses transitórios, foi utilizado o mesmo sistema teste da figura 4.3. Esse sistema, consiste em dois alimentadores classe 15 kV supridos pela mesma subestação rebaixadora. Os transitórios incidiram nos pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 assinalados na figura 4.3 e o ângulo de incidência da tensão da fase “A”, no ponto de chaveamento, foi 0°, 45°, 60° e 90°. Esse sistema foi modelado no software ATPDraw® e será descrito em detalhes no Capítulo 5.

Para o treinamento da rede com banco de capacitores foram utilizados bancos de 600 kVAr e 900 kVAr. Para a energização de transformadores foram modelados transformadores trifásicos de 75 kVA, 300 kVA e transformadores

monofásicos de 25 kVA, sendo que durante a energização o secundário desses equipamentos foi mantido aberto. Esses valores de potência dos bancos de capacitores e dos transformadores foram escolhidos por serem valores tipicamente utilizados pelas concessionárias. Entretanto, o banco de capacitores de 900 kVAr é mais utilizado no interior das subestações, mas também conectado nos alimentadores.

As FAIs foram simuladas com o modelo proposto por Nakagomi (2006) utilizando impedâncias de falta de 250Ω , 300Ω e 350Ω . Tanto FAIs do lado da carga como da fonte foram testadas. Os dados físicos e elétricos dos alimentadores, bem como a modelagem dos transformadores, capacitores e FAIs, no software ATPDraw[®], serão descritas em detalhes no Capítulo 5.

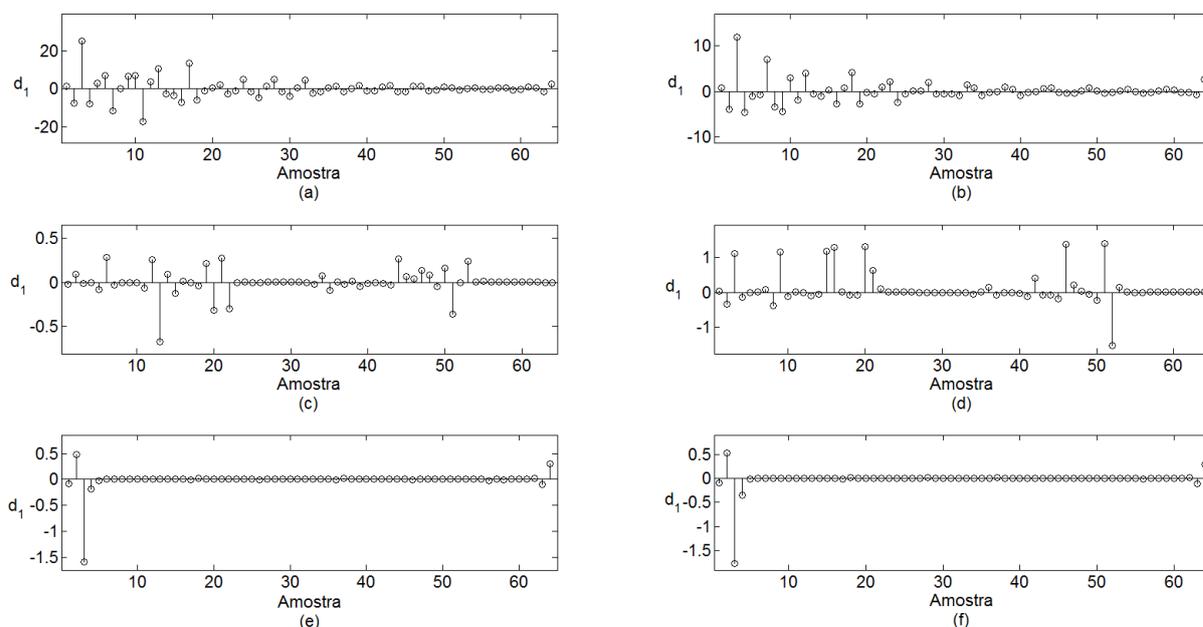


Figura 4.7 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da TWD. a) chaveamento de banco de capacitores de 600 kVAr, b) chaveamentos de banco de capacitores de 900 kVAr, c) energização de transformador de 75 kVA, d) energização de transformador de 300 kVA, e) FAI do lado da carga com resistência de falta de 250Ω , f) FAI do lado da fonte com resistência de falta de 350Ω

A matriz de pesos LW da GRNN contém os índices de identificação dos sinais de entrada, ou seja, é nessa matriz de pesos que se define o que é cada coluna da matriz P . No processo de treinamento da GRNN as entradas da matriz P podem ser: energização de capacitor, transformador ou FAI, sendo que a codificação utilizada para identificar cada um desses transitórios é apresentada na tabela 4.1 juntamente

com o número de sinais de cada tipo de transitório que foram utilizados no processo de treinamento da GRNN.

Tabela 4.1 - Processo de treinamento da GRNN

Tipo de Transitório	Número de sinais utilizados no processo de treinamento da GRNN	Índice Identificador
Chaveamento de banco de capacitores	26	1
Falta de alta impedância	39	2
Energização de transformadores (Inrush)	42	3

Para que a GRNN atue como uma rede classificadora a matriz de pesos LW precisa ser convertida de índices para vetores. Um exemplo dessa conversão é apresentado a seguir:

$$LW=[1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1 \ 2 \ 3]$$

$$LW_v=(1,1),(1,2),(1,3),(2,4),(2,5),(2,6),(3,7),(3,8),(1,9),(1,10),(2,11),(3,12)$$

onde LW_i é a matriz de pesos com índices e LW_v a matriz resultante da conversão dos índices de LW_i para vetores. Nessa conversão a coluna 1 dos vetores de LW_v representa o valor do índice e a coluna 2 a posição desse índice na matriz de LW_i .

A saída da rede será composta por uma matriz de três linhas e uma coluna, sendo que cada linha possui um valor entre zero e 1 e que somados podem resultar no máximo um valor igual a 1. Cada um desses valores é referente à proximidade da entrada com os valores armazenados para cada tipo de transitório durante o treinamento. Sendo que um valor igual 1 representa que a entrada é exatamente igual a um dos sinais utilizados no treinamento e um valor igual a zero representa a total diferença entre a entrada e os sinais utilizados no treinamento. Sendo assim, a saída que estiver mais próxima de 1 representa a origem do transitório. A ordem dos valores de saída da rede são referentes a codificação apresentada na tabela 4.1, ou seja, linha 1 para chaveamento de capacitores, linha 2 para FAI e linha 3 para energização de transformadores. Um exemplo de valores possíveis de saída da GRNN é:

$$\begin{bmatrix} 0,15 \\ 0,8 \\ 0,05 \end{bmatrix}$$

Nesse exemplo, a linha dois da matriz de saída da GRNN possui o valor mais próximo de 1, o que define que o transitório utilizado na entrada da rede é relativo a uma FAI.

Em algumas situações pode ocorrer que todos os valores da matriz de saída da rede sejam muito baixos (próximos a zero). Isso pode ocorrer, por exemplo, quando a fonte do transitório detectado é um equipamento não utilizado no treinamento da rede. Dessa maneira, se a classificação fosse feita com base apenas no maior valor do vetor de saída da rede, poderia ocorrer classificações incorretas.

Outra situação que pode ocorrer é quando os três valores da matriz de saída estão muito próximos de 0,33. Valores iguais a esses, representam que o sinal de entrada possui características próximas aos três padrões utilizados no treinamento da rede. O mesmo acontece se dois valores da matriz de saída estão muito próximos de 0,5 e o terceiro é zero, entretanto nesse caso o sinal de entrada é próximo a apenas dois dos padrões utilizados no treinamento da rede. Essa situação também pode gerar atuações indevidas. Para evitar essa inconsistência, foi definido no algoritmo proposto nesse trabalho que, para uma classificação ser considerada correta, o valor da sua respectiva linha deve ser maior que 0,5 e as outras linhas não devem ter valores maiores que 0,45. Esses ajustes podem ser interpretados da seguinte maneira: o algoritmo só classifica um transitório quando a resposta da GRNN for suficientemente confiável.

O valor 0,5 foi definido, por ser o menor valor que uma das três linhas do vetor de saída da GRNN pode obter sem que as outras linhas possam ter um valor maior. Por exemplo, quando uma das linhas for 0,51 o máximo valor que uma das outras linhas pode obter é 0,49, pois o somatório das três linhas pode ser no máximo 1. A escolha do valor 0,45 foi feita heurísticamente, sendo que esse ajuste obteve os melhores resultados.

O treinamento da GRNN foi realizado através da função *newgrnn* do software MatLab®. Para a conversão dos índices de *LW* para vetores, foi utilizado a função *ind2vec*. A figura 4.8 apresenta a estrutura da rede com as matrizes após o treinamento.

Uma das maiores vantagens da GRNN quando utilizada como classificadora é que, o processo de aprendizado ocorre em um único passo (não é um processo iterativo). Isso quer dizer que, após a rede ter calculado seus pesos, pela primeira vez, com base nas assinaturas dos transitórios, ela não precisa ser novamente

treinada. O processo de treinamento só precisa ser repetido caso se deseje acrescentar novos padrões, como por exemplo, um transitório gerado por um novo tipo de equipamento. Essa característica da GRNN é ideal em aplicações reais, pois diminui a carga computacional e facilita a customização da rede.

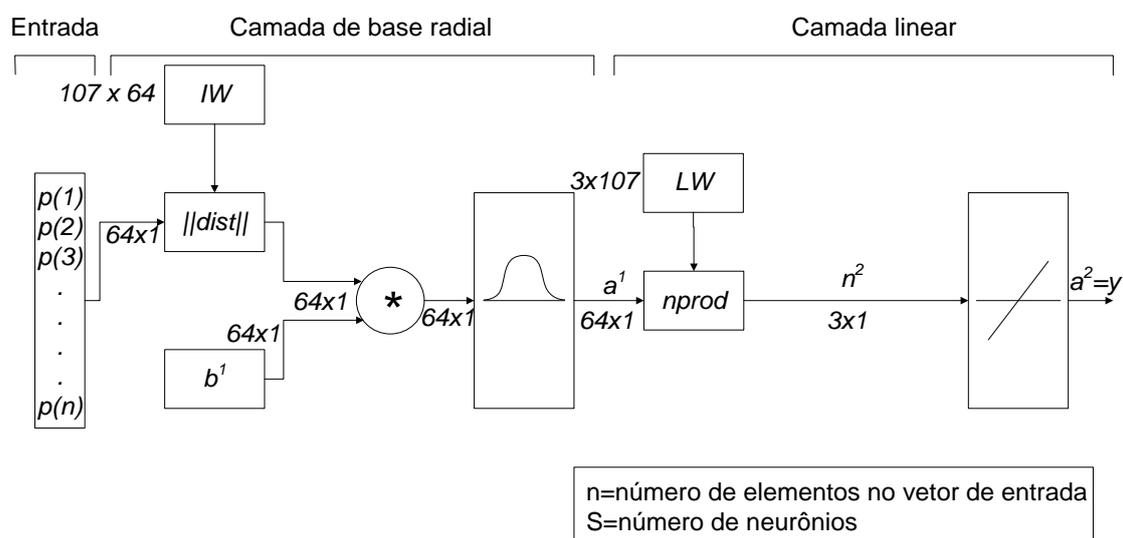


Figura 4.8 - Diagrama de bloco da GRNN utilizada no algoritmo proposto

Depois de realizado o treinamento, sempre que for detectado um transitório, o algoritmo aguarda a formação de uma janela com as próximas 128 amostras do sinal de erro do PLL, incluindo a amostra inicial do transitório. Dessa janela, são extraídos os coeficientes de detalhe do primeiro nível da TWD (bloco “Coeficientes de Detalhe do Primeiro Nível” do fluxograma da figura 4.1) e esses são utilizados como entrada na GRNN que classifica o transitório como chaveamento de banco de capacitores (1), FAI (2) ou energização de transformadores (3).

O exemplo da figura 4.9 pode ser utilizado para uma melhor compreensão sobre a formação da nova janela de dados. Nesse exemplo, pode-se observar que a janela utilizada para extração dos coeficientes de detalhe que serão utilizados como entrada da rede é a janela formada com as quatro amostras após o início do transitório (posição três).

O atraso de 128 amostras imposto pelo algoritmo é necessário para que se possam obter as características do transitório e por que a rede foi treinada com os coeficientes de detalhe referente a uma janela desse mesmo tamanho.

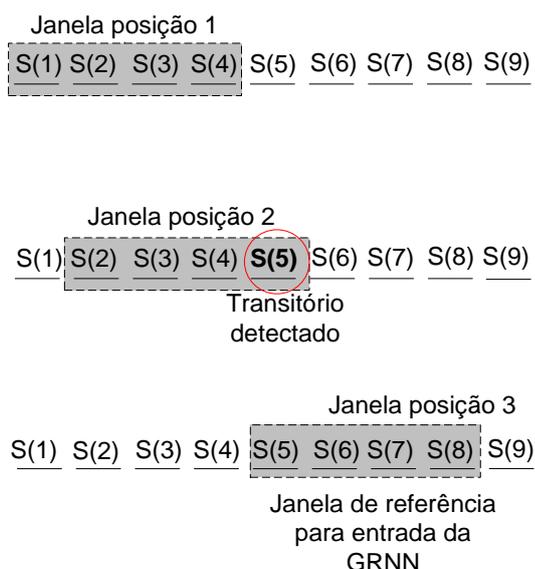


Figura 4.9 - Exemplo para formação da nova janela depois de detectado um transitório

Os transitórios gerados por manobras de entrada de carga, não foram utilizados diretamente no processo de treinamento da GRNN, pois nos sistemas de distribuição, todas as cargas são conectadas ao secundário de transformadores e assim possuem as mesmas características dos transitórios causados pela energização desse equipamento. Dessa maneira, na ocorrência de manobras de entrada de cargas, a GRNN deve classificar o transitório como energização de transformadores.

As assinaturas dos transitórios que representam saídas de carga também não foram utilizadas no processo de aprendizado da GRNN, pois na maioria dos casos, não chegaram a sensibilizar o detector de transitórios apresentado no item 4.4. Entretanto, nos casos que o detector foi sensibilizado por esses transitórios a rede classificou o transitório como FAI devido às semelhanças no sinal de erro do PLL, conforme se pode observar na figura 4.2.

Para corrigir essa classificação, a condição adicional apresentada no fluxograma da figura 4.10 foi implementada no algoritmo proposto, onde $e(n)$ é o valor do sinal de erro do PLL no instante em que foi detectado o transitório. Essa condição representa matematicamente a diferença básica no sinal de erro do PLL quando ocorre uma saída de carga e uma FAI.

Através de simulações, constatou-se que no instante n em que ocorre uma saída de carga o sinal de erro do PLL sofre uma variação brusca, e sua próxima derivada não muda de sentido (figura 4.11-a). Já no instante que uma FAI ocorre em

um alimentador, o sinal de erro do PLL também sofre uma variação brusca, entretanto seguida de uma inversão no sentido da sua derivada (figura 4.11-b). Essa diferença entre os sinais de erro do PLL, no instante em que ocorre um transitório, se repetiu em todos os casos testados. Sendo assim, essa condição foi implementada no bloco CARGA do fluxograma da figura 4.1 e é testada sempre que a rede classifica um transitório como FAI.

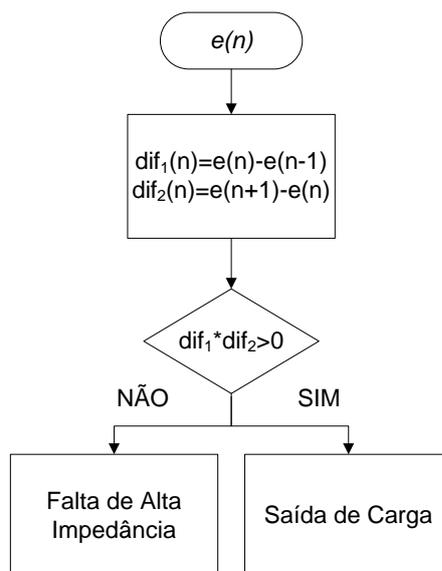


Figura 4.10 - Fluxograma da condição adicional

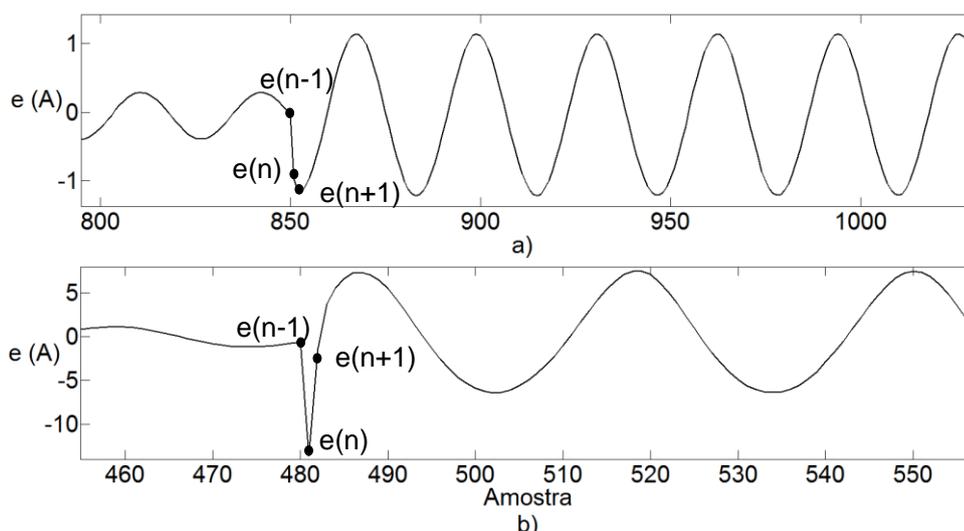


Figura 4.11 - Sinal de erro do PLL para: a) saída de carga, b) falta de alta impedância.

4.6 Considerações Finais

Nesse capítulo foi apresentado um novo algoritmo capaz de detectar FAIs. Além disso, a metodologia detecta e classifica outros tipos de transitórios nos sistemas de distribuição. Essa característica a torna bastante confiável em aplicações reais, pois diminui o risco de operação indevida. O algoritmo proposto faz uso de três ferramentas matemáticas já consagradas na literatura, PLL, TWD e GRNN. Os ajustes, bem como a função de cada uma dessas ferramentas no algoritmo proposto, foram detalhados nesse capítulo.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

5.1 Considerações Gerais

Nesse capítulo será apresentado o sistema teste, bem como os tipos de transitórios e parâmetros utilizados no processo de validação do algoritmo proposto. Uma breve descrição sobre as causas e consequências desses transitórios também será apresentada. Por fim, esse capítulo apresentará os resultados e discussões obtidos nos testes do algoritmo desenvolvido.

5.2 Ferramentas Computacionais Utilizadas

As simulações computacionais foram realizadas no programa ATP (“Alternative Transients Program”). O ATP é um conjunto completo de ferramentas para simulação digital e análise de transitórios eletromagnéticos. Foi inicialmente desenvolvida para analisar sistemas elétricos de potência. É também capaz de simular sinais de controle, aplicações de eletrônica de potência e demais situações híbridas envolvendo as áreas comentadas acima.

O programa ATP calcula as variáveis de interesse do sistema elétrico em função do tempo. Basicamente, utiliza regra de integração trapezoidal para resolver as equações diferenciais dos componentes do sistema. De um modo geral, as informações necessárias para o processamento de casos no ATP envolvem o fornecimento de um arquivo de dados contendo informações gerais tais como, por exemplo: passo de integração, tempo máximo de simulação e informações específicas que descrevem a rede elétrica, chaves, fontes de tensão ou corrente e ainda uma especificação de saída de resultados (medições).

A primeira versão (código fonte) surgiu no início de 1984 e seus desenvolvedores foram os Drs. W. Scott Meyer e Tsuhuei Liu. A partir disso, surgiram diversas distribuições com base no código fonte do ATP e, dentre essas, destaca-se o ATPDraw.

O desenvolvimento do ATPDraw foi motivado pelas facilidades operacionais encontradas no ambiente Windows. Nessa versão, o usuário constrói o seu circuito na tela, selecionando os componentes nos menus oferecidos, fazendo as devidas

conexões e fornecendo os parâmetros necessários. Como resultado é criado um arquivo de extensão .acp que servirá de entrada para o ATP.

Devido a essa maior facilidade, nesse trabalho, foi utilizada a versão ATPDraw do programa ATP para realizar as simulações.

Em virtude do alto desempenho voltado ao cálculo numérico e a facilidade de programação, muitos usuários utilizam o programa MATLAB[®] como primeira ferramenta para elaboração e testes de algoritmos. Depois de elaborado e validado, o algoritmo pode ser convertido para qualquer linguagem de programação a fim de implementá-lo em equipamentos reais como relés e religadores. Sendo assim, nesse trabalho, todos os algoritmos analisados, bem como o tratamento dos sinais, foram desenvolvidos no programa MATLAB[®].

5.3 Sistema Teste

A fim de validar o algoritmo proposto no Capítulo 3, diversos casos de transitórios foram simulados no mesmo sistema teste utilizado para o treinamento da GRNN. Esse sistema teste foi escolhido por representar dois tipos de alimentadores onde é bastante frequente a ocorrência das FAI, ou seja, alimentadores predominantemente urbanos e alimentadores predominantemente rurais. Os alimentadores rurais são críticos para as FAI devido a sua grande extensão tornando a impedância de falta ainda menor. Já os alimentadores urbanos possuem uma menor extensão, entretanto o risco de uma FAI ocorrer também é bastante elevado. Esse elevado risco, deve-se as possíveis superfícies de contato que possuem elevada impedância como, por exemplo, asfalto e concreto. Esse sistema teste pode ser visto na figura 5.1.

Os dois alimentadores que compõem o sistema teste são classe 15 kV e são supridos através da mesma subestação rebaixadora (69/13,8 kV). O TAP do transformador está ajustado para que a tensão em seu secundário permaneça em 14,1 kV. O alimentador AL.1 possui uma menor extensão e cargas mais concentradas, típico de alimentadores urbanos. O AL. 2 simula um alimentador rural, pois possui cargas mais dispersas e uma maior extensão em relação ao AL. 1.

Os alimentadores foram modelados dessa maneira para representar os dois casos típicos de alimentadores que as concessionárias possuem, ou seja, um

alimentador urbano com cargas concentradas e um alimentador rural de maior extensão e com cargas mais esparsas.

A incidência dos transitórios foi simulada em diversas posições (1, 2, 3, 4, 5, 6) nos alimentadores, conforme se pode observar na figura 5.1. A impedância série acumulada de cada trecho onde foram simulados os transitórios é apresentada na tabela 5.1. Apesar de, na prática, existir uma pequena diferença entre as impedâncias dos cabos de cada fase, nessas simulações essas impedâncias serão consideradas iguais, ou seja, $Z_{1A}=Z_{1B}=Z_{1C}$, onde Z_{1A} é a impedância de sequencia positiva da fase “A” no trecho 1.

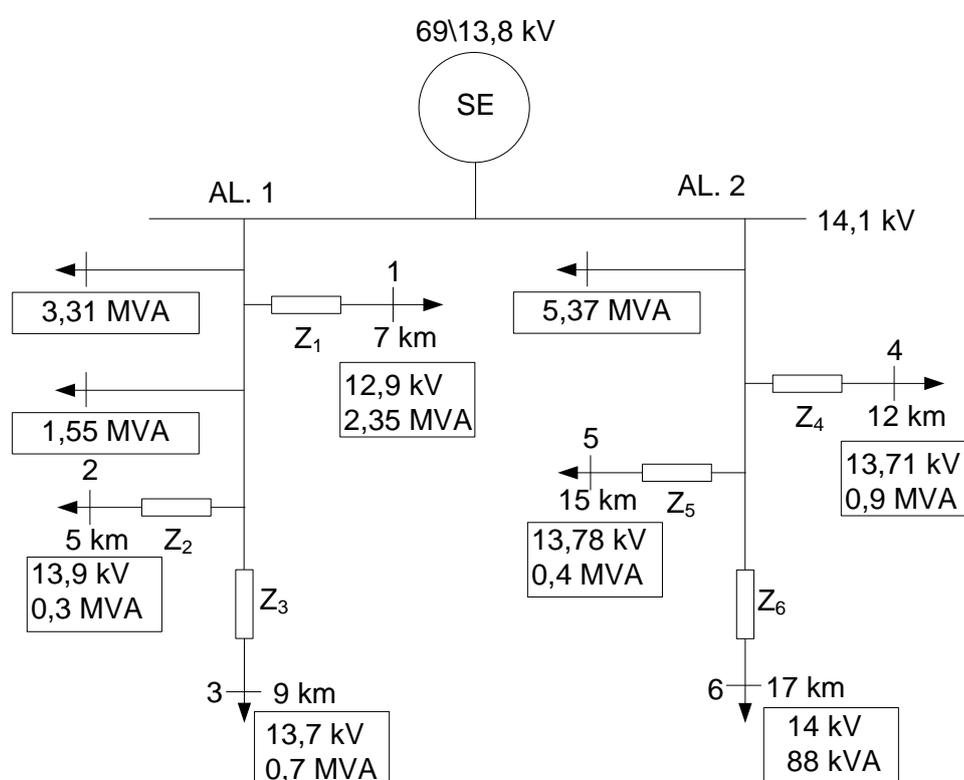


Figura 5.1 - Sistemas testes utilizados para validação

Tabela 5.1 - Impedâncias acumuladas por trecho

Trecho	$R_A=R_B=R_C$ (Ω)	$X_A=X_B=X_C$ (Ω)
Z ₁	1,66	7,34
Z ₂	3,083	5,85
Z ₃	2,33	9,08
Z ₄	3,09	6,20
Z ₅	5,25	8,46
Z ₆	7,04	9,87

A fim de validar o algoritmo proposto, os seguintes transitórios foram simulados no sistema teste:

- manobras de carga (entrada e saída de ramais monofásicos e trifásicos);

- energização de banco de capacitores;
- energização de transformadores e;
- faltas de alta impedância do lado da carga e também da fonte.

A modelagem de cada um desses transitórios no software ATPDraw[®] é descrita a seguir.

5.3.1 Manobras de cargas

Uma das situações mais rotineiras em redes de distribuição é a manobra de ramais, seja para manutenções preventivas ou para expansão da rede. Essas manobras podem envolver operações monopolares, como, por exemplo, as executadas através de chaves fusíveis, e também tripolares como, por exemplo, as executadas por religadores. Tanto uma como a outra geram transitórios nos sinais de corrente e esses transitórios se não identificados corretamente, podem gerar atuações indevidas dos sistemas de proteção. Sendo assim, é de suma importância que o algoritmo proposto nesse trabalho seja testado nessas condições.

Para os testes envolvendo manobras de ramais, tanto entrada como saída de cargas foram simuladas. Nas duas situações todos os transformadores presentes nos ramais foram considerados com 80% de seu carregamento nominal e alimentando cargas de fator de potência 0,85.

Para as entradas de carga foram utilizados três ramais monofásicos e dois trifásicos. Os ramais monofásicos possuem dois transformadores no primeiro ramal, cinco no segundo e dez no terceiro, sendo que a potência de cada transformador é 25 kVA. Já os ramais trifásicos possuem, três transformadores trifásicos de 75 kVA em um dos ramais e dez de 75 kVA no outro. Esses ramais foram chaveados nas diversas posições indicadas no sistema teste e em instante variados de tempo. Esses instantes de tempo foram definidos para que o ângulo da tensão na fase “A” no ponto de chaveamento dos ramais, no momento da conexão, seja: 0°, 45°, 60° e 90°. Para os casos de entrada de carga, foram gerados setenta e oito casos.

Esses mesmos ramais também foram utilizados para os testes de saída de carga. Entretanto, nos ramais trifásicos foram simuladas aberturas monopolares, através de chaves fusíveis, em que apenas uma das fases do ramal é interrompida e também aberturas tripolares, como as realizadas por equipamentos religadores, em que as três fases são interrompidas simultaneamente. A desconexão desses ramais também foi realizada nas posições indicadas no sistema teste e em instantes de

tempo variados. Esses instantes de tempo foram definidos para que o ângulo da tensão na fase “A” no ponto de chaveamento dos ramais, no momento da desconexão, seja: 0°, 45°, 60° e 90°. Para os testes envolvendo saída de carga, foram gerados sessenta casos.

A tabela 5.2 apresenta, de forma resumida, a composição dos ramais utilizados nas simulações, o tipo de manobra realizado, e também o número de casos gerados para cada manobra.

A modelagem de cada transformador utilizado nessas simulações será descrita em detalhes na subseção 5.3.3.

Tabela 5.2 - Composição de ramais, tipos de manobra e numero de casos.

	Número de Transformadores		Entrada de carga		Saída de carga	
	Trifásico 75 kVA	Monofásico 25 kVA	Tipo de abertura	Casos gerados	Tipo de abertura	Casos gerados
Ramal 1		2	Monopolar	18	Monopolar	6
Ramal 2		5	Monopolar	18	Monopolar	12
Ramal 3		10	Monopolar	18	Monopolar	6
Ramal 4	3		Tripolar	12	Monopolar/Tripolar	18/6
Ramal 5	10		Tripolar	12	Monopolar/Tripolar	6/6

5.3.2 Energização de banco de capacitores

Os bancos de capacitores são muito utilizados nas redes de distribuição para reduzir as perdas ocasionadas por um baixo fator de potência e conseqüentemente aumentar a capacidade do sistema e melhorar os níveis de tensão. Esses equipamentos são instalados nas subestações ou no decorrer dos alimentadores e sua potência e posição de instalação dependem de estudos dos setores de engenharia das concessionárias.

Na energização de um banco de capacitores, ocorrem transitórios eletromagnéticos que se traduzem pelo aumento dos valores de corrente e de frequência. Os valores atingidos nesses transitórios e sua duração dependem, entre outros fatores, do valor instantâneo da tensão no momento do chaveamento, da capacitância inserida e da carga inicial do banco de capacitores. Por exemplo, quando um banco de capacitores está descarregado, esse equipamento se comporta como um curto-circuito, durante a energização, ocasionando valores elevados de corrente.

Devido a essas características, é de suma importância a validação do algoritmo proposto diante desse tipo de transitório, primeiramente para verificar se o chaveamento do banco de capacitores não será identificado como uma FAI e em segundo lugar se o algoritmo proposto irá classificar esse transitório corretamente.

Foram modelados dois bancos de capacitores trifásicos, o primeiro com potência de 600 kVAr e o segundo 900 kVAr. O banco de 600 kVAr é formado por três unidades monofásicas de 200 kVAr, enquanto que o de 900 kVAr é formado por três unidades monofásicas de 300 kVAr. Os dois bancos são conectados em estrela não aterrada. Esse tipo de ligação é bastante utilizado pelas concessionárias, pois cada unidade irá trabalhar sob tensão de fase ($13,8 \text{ kV}/\sqrt{3}$), e assim a concessionária pode adquirir unidades mais baratas devido a menor classe de isolamento. O fato de não se aterrar a ligação é devido às situações em que uma unidade capacitiva parar de funcionar. Caso o banco de capacitores esteja conectado em estrela aterrada, no instante em que uma unidade capacitiva parar de funcionar, irá começar a circular uma corrente elétrica pelo aterramento podendo causar acidentes com seres vivos. Na situação em que a ligação não é aterrada, no instante em que uma unidade parar de funcionar, as outras duas passarão a ficar em série e, apesar da capacidade de correção do fator de potência diminuir, continuarão corrigindo.

Na modelagem dos bancos de capacitores, foram consideradas unidades com tensão nominal de 8,2 kV e capacitâncias de 7,89 μF para os bancos de 200 kVAr e 11,83 μF para os bancos de 300 kVAr. A resistência elétrica das chaves de manobra dos bancos de capacitores foi desprezada.

Cada um dos bancos de capacitores foi chaveado nas diversas posições indicadas no sistema teste e em instantes de tempo variados. Esses instantes de tempo foram definidos para que o ângulo da tensão na fase “A” no ponto de chaveamento do banco de capacitores, no momento da conexão, seja: 0°, 45°, 60° e 90°. Foi gerado um total de setenta e quatro casos distintos, sendo que a metade dos casos é referente à energização de bancos de 600 kVAr e a outra metade referente a bancos de 900 kVAr.

5.3.3 Energização de transformadores

Segundo Guerra (2009), os transformadores utilizados nos sistemas elétricos de potência requerem, em regime permanente, correntes de excitação da ordem de 0,5% a 2% da corrente nominal. Entretanto, durante o processo de energização, podem ocorrer surtos de corrente com valor de pico inicial que pode superar vinte vezes o valor de pico da corrente nominal, nas condições mais severas. Esse efeito é conhecido com *inrush*. Ainda segundo Guerra (2009), esses surtos podem durar vários ciclos e gerarem componentes de altas frequências.

A intensidade e a duração das correntes dependem, entre outros fatores, do valor instantâneo da tensão aplicada ao transformador no instante de energização, magnitude e sinal do fluxo residual no núcleo magnético, características magnéticas e geométricas do núcleo, além da impedância da carga ligada ao secundário.

Entre as consequências geradas pelas correntes de *inrush* estão os afundamentos de tensão temporários que afetam a qualidade da energia distribuída, a deterioração dos componentes do sistema devido ao sobreaquecimento causado pelo aumento da corrente e, a possível atuação indevida de fusíveis e relés de proteção. Devido, principalmente, a essas últimas consequências é que é importante validar o algoritmo proposto também nesse tipo de transitório.

Para isso, foram modelados três transformadores, um monofásico de 25 kVA e dois trifásicos, sendo um de 75 kVA e o outro de 300 kVA. Os transformadores trifásicos são formados por bancos de três transformadores monofásicos que são conectados em delta no lado de alta tensão (13,8 kV) e em estrela aterrada no lado de baixa tensão (380\220 V). Para o transformador de 75 kVA foram utilizados três transformadores monofásicos de 25 kVA, enquanto que para o de 300 kVA foram utilizados três transformadores monofásicos de 100 kVA.

Cada transformador foi implementado através do bloco TRAF0_S que pode ser acessado em *Transformers – Saturable 1 Phase*. Os valores atribuídos as variáveis de cada bloco e os dados das curvas de magnetização foram calculados conforme Chaves (2012) e podem ser vistos na tabela 5.3 e tabela 5.4.

Nessa subseção, todos os casos gerados consideraram o secundário do transformador em aberto. Essa consideração foi feita, pois nas simulações referentes à entrada de carga já foi considerado os transformadores com carga. Sendo assim, uma maior variedade de transitórios é obtida.

Da mesma maneira que nos outros transitórios simulados, os transformadores foram energizados nas posições indicadas no sistema teste e em instantes de tempo variados. Esses instantes de tempo foram definidos para que o ângulo da tensão na fase “A” no ponto de chaveamento do transformador, no momento da conexão, seja: 0°, 45°, 60° e 90°. Foi gerado um total de cento e cinco casos, sendo trinta e cinco para cada transformador modelado (25 kVA, 75 kVA, 300 kVA).

Tabela 5.3 - Parâmetros de entrada do bloco TRAF0_S

Atributo	25 kVA	75 kVA	300 kVA
I_0 (A)	0	0	0,184
F_0 (Wb-turn)	0	0	51,8
Rmag (Ω)	528900	2004630	635159,92
Rp (Ω)	52,81	59,4173	10,655
Lp (Ω)	93,4	119,39	41,5
Vrp (kV)	7,967	13,800	13,800
Rs(Ω)	0,04027	0,0053	0,00271
Ls (Ω)	0,07122	0,0101	0,01055
Vrs (kV)	0,220	0,220	0,220
RMS	0	0	0

Tabela 5.4 - Dados de curva de magnetização

25 kVA		75 kVA		300 kVA	
I (A)	Fluxo (Wb-T)	I(A)	Fluxo (Wb-T)	I (A)	Fluxo (Wb – T)
0,01198	3,739	0,0041	6,475	0,0184	6,475
0,1198	29,91	0,041	51,8	0,184	51,8
1,19	33,65	0,41	58,27	1,84	58,27
11,9	36,64	4,1	63,455	18,4	63,45

5.3.4 Falhas de Alta Impedância

Através do modelo computacional para falhas de alta impedância apresentado na subseção 2.4.2, foram gerados oitenta casos de FAI. Sendo que, a metade desses casos é de curtos-circuitos do lado da carga, e a outra metade referente a curtos-circuitos do lado da fonte. Tanto para o lado da carga como para o lado da fonte, foram utilizados resistências de falta (R_{falha}) de 250 Ω , 300 Ω e 350 Ω . Assim como nos outros casos gerados, as incidências das falhas ocorreram nas posições indicadas no sistema teste da figura 5.1 e em instantes de tempo variados. Esses instantes de tempo foram definidos para que o ângulo da tensão na fase em falta e no instante da ocorrência da FAI, seja: 0°, 45°, 60° e 90°.

5.4 Resultados

Para facilitar o processo de validação do algoritmo, devido ao elevado número de casos gerados (397), foi desenvolvida uma interface através da ferramenta GUIDE do software MatLab[®]. Essa interface permite que todos os casos sejam carregados uma única vez, não sendo necessário aguardar o algoritmo validar um caso para que o usuário carregue outro. Ao final da validação dos casos carregados, o algoritmo gera um relatório contendo a classificação de cada caso carregado na interface.

A figura 5.2 apresenta a interface criada para validação do algoritmo e a figura 5.3, o relatório gerado para alguns casos testados.

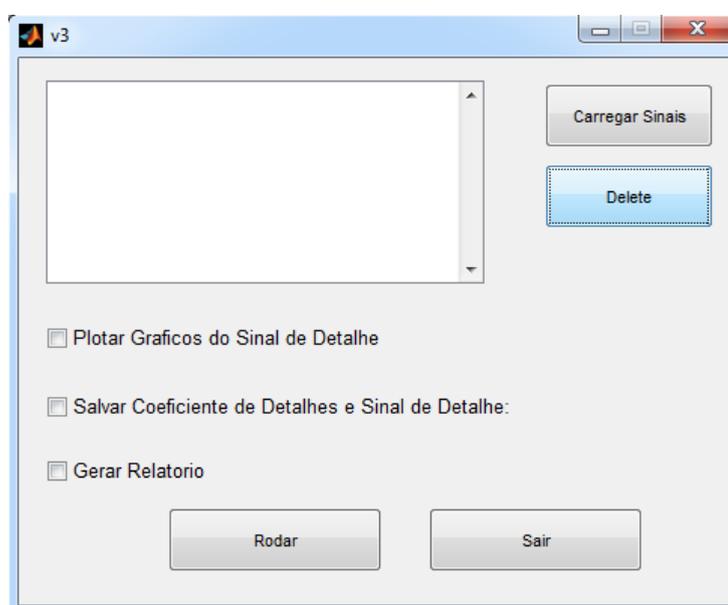


Figura 5.2 - Interface para validação do algoritmo proposto

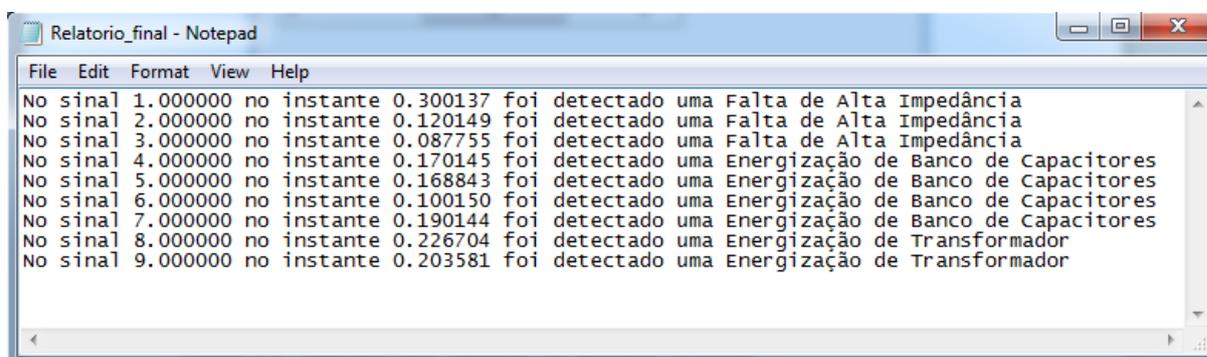


Figura 5.3 - Relatório contendo a resposta do algoritmo proposto para alguns casos testados

5.4.1 Caso 1 – Manobra de Cargas

As manobras referentes às entradas de carga não foram utilizadas diretamente no processo de treinamento da GRNN, pois, na distribuição, todas as cargas são conectadas ao secundário de transformadores e, devido a isso, esses transitórios possuem as mesmas características da energização de transformadores. Dessa maneira, a resposta esperada do algoritmo para esse tipo de transitório é um valor próximo a 1 na terceira linha do vetor de saída da GRNN, o que caracteriza a energização de transformadores.

O algoritmo proposto foi testado com os setenta e oito casos gerados. Em três casos o transitório foi detectado, mas não o classificou. Isso ocorreu porque em cada um desses casos o vetor de saída da GRNN obteve dois valores próximos a 0,5, e valores próximos a 0,5 demonstram incerteza na classificação, sendo assim, para evitar uma atuação indevida, o algoritmo não classificou o transitório em nenhum dos tipos utilizados no treinamento da GRNN.

Nos setenta e cinco casos restantes a rede detectou e classificou adequadamente o transitório. Sendo que o valor médio encontrado na terceira linha do vetor de saída da GRNN foi 0,85, o que demonstra que mesmo se o transformador estiver com carga, a assinatura extraída, durante a energização, muda pouco em relação aos transformadores sem carga que foram utilizados no treinamento da GRNN. A tabela 5.5 apresenta os três casos que não foram classificados pelo algoritmo juntamente com os valores do vetor de saída da GRNN e a resposta do detector de transitórios.

Tabela 5.5 - Principais resultados dos testes de entrada de carga

Característica do Transitório	Saída do Detector de Transitórios (SIM/NÃO)	Saída da GRNN (Capacitores FAI Transformadores)
Ramal com 2 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveados no ponto 3, instante 0,075 s	Sim	0 0,46 0,53
Ramal com 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 2, instante 0,22 s	Sim	0 0,46 0,53
Ramal com 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveados no ponto 2, instante 0,55 s	Sim	0 0,48 0,51

Os dois casos de entrada de carga com ramais monofásicos não foram classificados corretamente como energização de transformadores, pois o sinal de erro do PLL nesses transitórios sofreu pouca distorção o que gerou coeficientes de detalhe do primeiro nível com amplitude muito reduzida que são semelhantes aos utilizados no treinamento da rede para identificar FAI. Segundo Guerra (2009), essa menor distorção no sinal de erro do PLL pode ser explicada pelo fato de que no instante em que esses ramais foram chaveados a tensão no ponto de chaveamento estava no seu valor máximo (valor de pico) e nessa condição, considerando o fluxo inicial igual zero, não ocorre assimetria na forma de onda da corrente de *inrush*. Como a assimetria está relacionada à presença de componentes de frequência diferentes da fundamental, isso justifica a pouca distorção no sinal de erro do PLL e os valores reduzidos dos coeficientes de detalhe do primeiro nível.

O ramal com três transformadores de 75 kVA não foi classificado corretamente, pois o detector de transitórios atuou antes do início do transitório. Assim os coeficientes de detalhe do primeiro nível foram extraídos do sinal de erro do PLL que estava praticamente constante, obtendo valores muito reduzidos que acabaram ativando alguns neurônios referentes a FAI.

A figura 5.4 mostra os coeficientes de detalhe do primeiro nível referentes à janela com 128 amostras a partir do início dos transitórios apresentados na tabela 5.5. Nessa figura se pode perceber a semelhança com os coeficientes de detalhe do primeiro nível das FAI mostrados na figura 4.7.

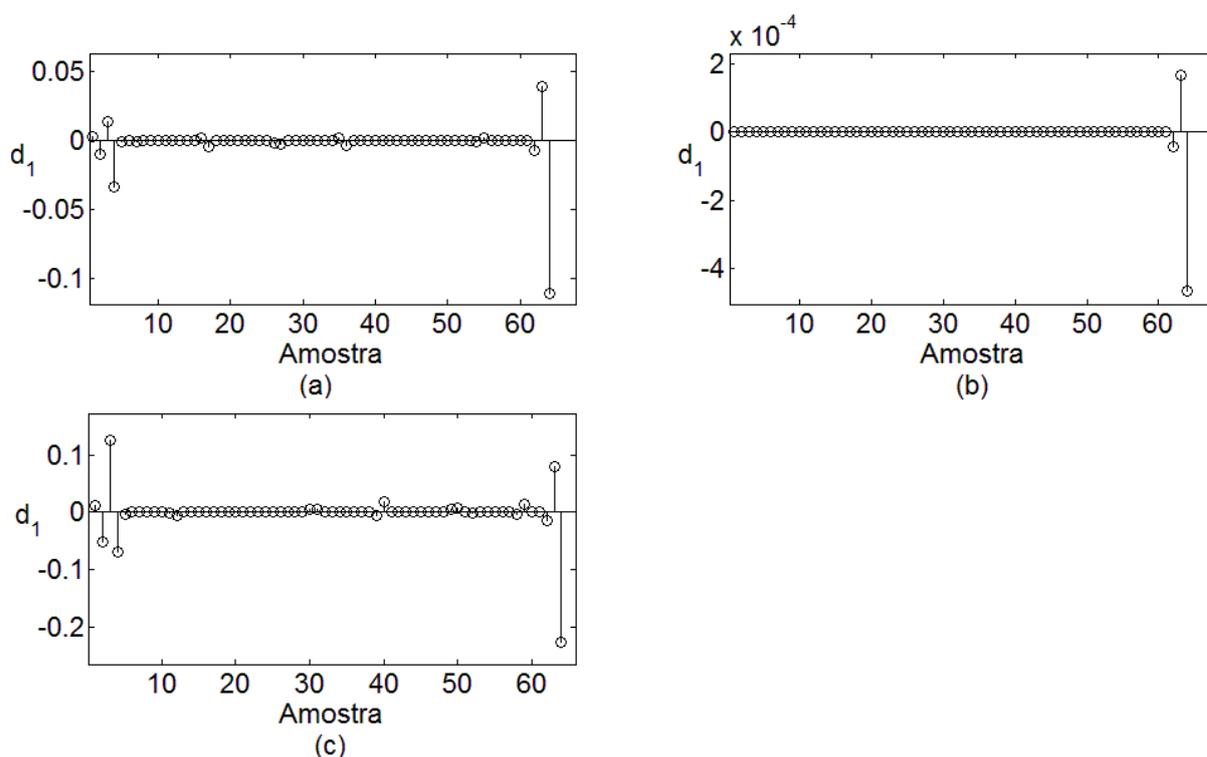


Figura 5.4 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível referentes a entrada de carga de: (a) Ramal com 2 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveados no ponto 3, (b) Ramal com 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 2, (c) Ramal com 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveados no ponto 2.

As manobras de saída de carga também não foram utilizadas no processo de treinamento da GRNN, pois em grande parte dos casos não sensibilizaram o detector de transitórios. Entretanto, em alguns casos, esse tipo de manobra foi detectado pelo algoritmo e classificado pela GRNN como FAI. Para corrigir essa classificação, a condição adicional do fluxograma da figura 4.10 foi implementada no algoritmo proposto. Sendo assim, a fim de testar o desempenho da técnica proposta e da condição adicional implementada, os sessenta casos gerados desse tipo de manobra de carga foram apresentados ao algoritmo proposto. Desses sessenta casos, dezessete foram classificados incorretamente pela GRNN como FAI, mas tiveram sua classificação corrigida através da condição adicional da figura 4.10. Treze foram detectados, mas não classificados, pois obtiveram dois valores muito próximos a 0,5. Os outros trinta casos, não sensibilizaram o detector de transitórios.

Todos os casos que não foram classificados corretamente pela GRNN, inclusive os corrigidos através da condição adicional da figura 4.10, são mostrados na tabela 5.6. Nessa tabela também podem ser vistos os valores do vetor de saída da GRNN e a resposta do detector de transitórios.

Nos casos 1 a 17 apresentados na tabela 5.6, o vetor de saída da GRNN obteve valores acima de 0,5 na segunda linha e valores abaixo de 0,45 na terceira, com esses valores o algoritmo classificou o transitório como FAI. Após essa classificação o algoritmo aplicou a condição adicional da figura 4.10 e reclassificou esses casos como saída de carga. Para os casos 18 a 30 mostrados na tabela 5.6, o vetor de saída da GRNN obteve valores acima de 0,5 na terceira linha e valores acima de 0,45 na segunda. Isso fez com que o algoritmo não gerasse nenhuma classificação para esses transitórios.

Como se pode perceber pela tabela 5.6, todos os casos que não foram corretamente identificados pela GRNN foram classificados como FAI ou como energização de transformadores. Isso ocorreu, pois os coeficientes de detalhe do primeiro nível desse tipo de transitório possuem valores próximos tanto dos sinais utilizados no treinamento da GRNN para identificar as FAI como os utilizados para identificar a energização de transformadores. Alguns coeficientes de detalhe dos transitórios referentes à saída de carga podem ser vistos na figura 5.5.

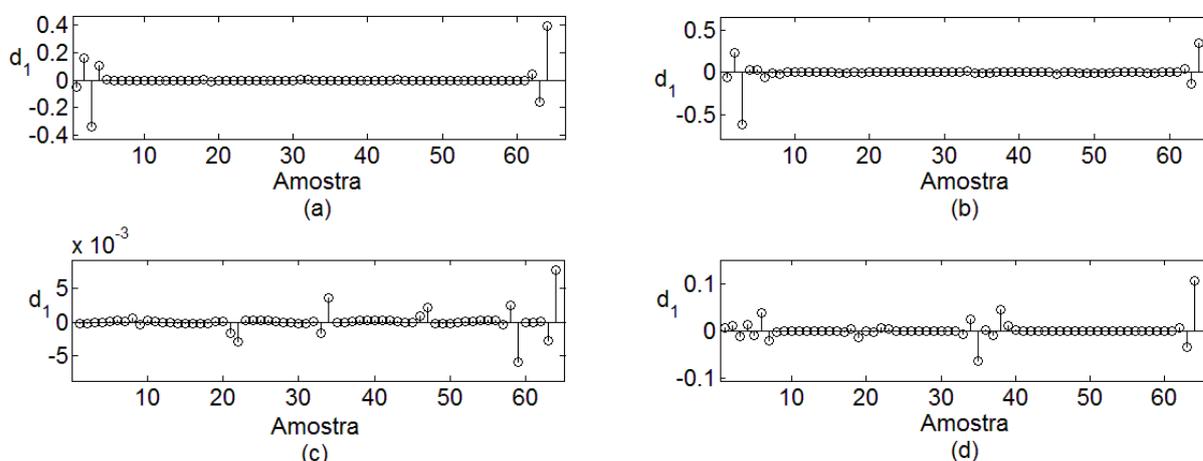


Figura 5.5 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível referentes ao transitório causado pela saída de: (a) ramal com 10 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveado no ponto 2, (b) ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado na ponto 1, abertura monopolar, (c) ramal com 5 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveados no ponto 2, (d) ramal com 3 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado na ponto 1, abertura monopolar

Vale salientar que, mesmo não classificando todos os casos testados referentes a manobras de carga, em nenhuma situação o algoritmo proposto classificou um transitório como FAI o que geraria um desligamento desnecessário. Esse bom desempenho, deve-se às condições adicionais implementadas no

algoritmo proposto. Essas condições evitam que um transitório seja classificado se não houver certeza suficiente para tal e também que manobras de saída de carga sejam classificadas como FAI.

Tabela 5.6 - Principais resultados dos testes de saída de carga

Característica do Transitório	Saída do Detector de Transitórios (SIM/NÃO)	Saída da GRNN (Capacitores FAI Transformadores)
Caso 1 - Ramal com 10 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveado no ponto 2, instante 2,37 s	Sim	0 0,58 0,42
Caso 2 - Ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado na ponto 2, abertura tripolar, instante 2,3 s	Sim	0 0,69 0,31
Caso 3 - Ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado na ponto 2, abertura monopolar, instante 2,12 s	Sim	0 0,71 0,29
Caso 4 - Ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 1, abertura tripolar, instante 2,1 s	Sim	0 0,69 0,31
Caso 5 - Ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 1, abertura monopolar, instante 2,1 s	Sim	0 0,71 0,29
Caso 6 - Ramal com 10 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveados 3, instante 2,26 s	Sim	0 0,71 0,29
Caso 7 - Ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 3, abertura tripolar, instante 2,23 s	Sim	0 0,56 0,44
Caso 8 - Ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 3, abertura monopolar, instante 2,52 s	Sim	0 0,57 0,43
Caso 9 - Ramal com 10 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveados no ponto 4, instante 2,42 s	Sim	0 0,69 0,31
Caso 10 - Ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 4, abertura tripolar, instante 2,5 s	Sim	0 0,56 0,44
Caso 11 - Ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 4, abertura monopolar, instante 2,43 s	Sim	0 0,62 0,38
Caso 12 - Ramal com 10 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveados no ponto 5, instante 2,13 s	Sim	0 0,63 0,37
Caso 13 - Ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 5, abertura monopolar, instante 2,1 s	Sim	0 0,6 0,4
Caso 14 - Ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 5, abertura tripolar, instante 2,4 s	Sim	0 0,61 0,39
Caso 15 - Ramal com 10 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveados no ponto 6, instante 2,65 s	Sim	0 0,75 0,25

Característica do Transitório	Saída do Detector de Transitórios (SIM/NÃO)	Saída da GRNN (Capacitores FAI Transformadores)
Caso 16 - Ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 6, abertura monopolar, instante 2,31 s	Sim	0 0,61 0,39
Caso 17 - Ramal com 10 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 6, abertura tripolar, instante 2,3 s	Sim	0 0,65 0,35
Caso 18 - Ramal com 3 transformadores monofásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 2, abertura tripolar, instante 2,3 s	Sim	0 0,46 0,54
Caso 19 - Ramal com 5 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveados no ponto 2, instante 2,1 s	Sim	0 0,46 0,54
Caso 20 - Ramal com 3 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 1, abertura tripolar, instante 2,45 s	Sim	0 0,46 0,54
Caso 21 - Ramal com 3 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 1, abertura monopolar, instante 2,36 s	Sim	0 0,46 0,54
Caso 22 - Ramal com 10 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveados no ponto 1, instante 2,13 s	Sim	0 0,46 0,54
Caso 23 - Ramal com 3 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 3, abertura tripolar, instante 2,13 s	Sim	0 0,46 0,54
Caso 24 - Ramal com 3 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 3, abertura monopolar, instante 2,65 s	Sim	0 0,46 0,54
Caso 25 - Ramal com 5 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveados no ponto 3, instante 2,51 s	Sim	0 0,46 0,54
Caso 26 - Ramal com 5 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveados no ponto 4, instante 2,34 s	Sim	0 0,46 0,54
Caso 27 - Ramal com 5 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveados no ponto 5, instante 2,23 s	Sim	0 0,46 0,54
Caso 28 - Ramal com 5 transformadores monofásicos de 25 kVA, chaveados no ponto 6, instante 2,2 s	Sim	0 0,46 0,54
Caso 29 - Ramal com 3 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 5, abertura monopolar, 2,50 s	Sim	0 0,47 0,53
Caso 30 - Ramal com 3 transformadores trifásicos de 75 kVA, chaveado no ponto 6, abertura tripolar, 2,48	Sim	0 0,46 0,54

5.4.2 Caso 2 – Energização de Banco de Capacitores

Os setenta e quatro casos gerados, referentes a energização de banco de capacitores, foram testados no algoritmo desenvolvido. Para esses casos a saída

esperada da rede GRNN é um valor próximo a 1 na primeira linha do seu vetor de saída, ou no mínimo acima de 0,5. Para esse tipo de transitório, o algoritmo classificou corretamente todos os casos gerados, sendo que todos os valores encontrados na primeira linha do vetor de saída da GRNN foram iguais a 1 ou muito próximos (0,99). Esse valor indica que os coeficientes de detalhe do primeiro nível, quando extraídos do sinal de erro do PLL durante uma energização de banco de capacitores, apresentam características que se repetem independentemente da potência do banco, da posição ou do instante de tempo em que foi chaveado. Essas características também são suficientemente diferentes das assinaturas das FAI e energização de transformadores, o que evita classificações incorretas.

Na figura 5.6 podem ser vistos os coeficientes de detalhe do primeiro nível extraídos do sinal de erro do PLL durante a energização de banco de capacitores para alguns dos casos testados.

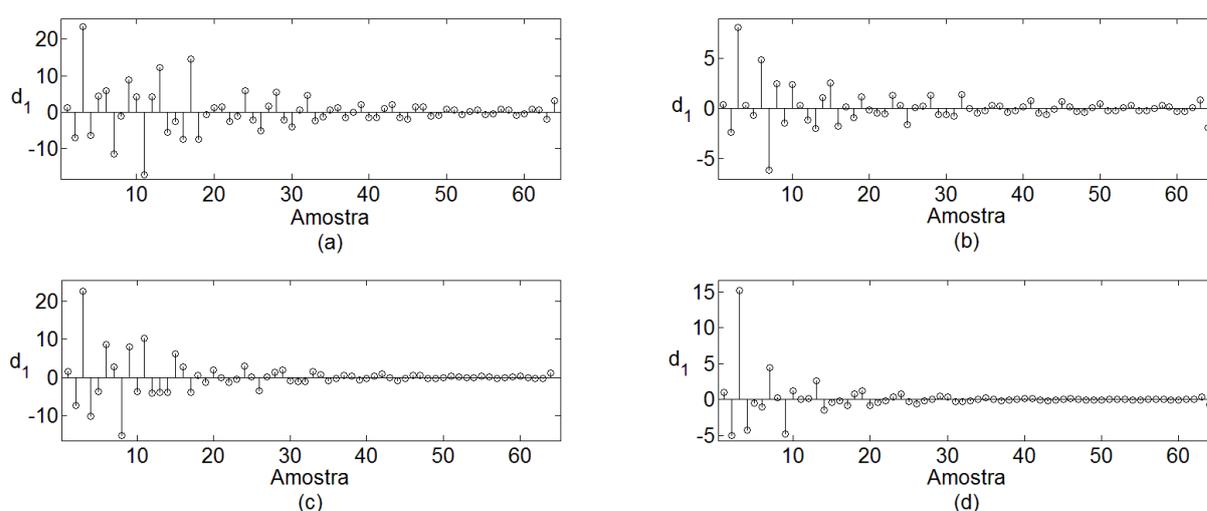


Figura 5.6 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível referentes a janela com as 128 primeiras amostras após o início do transitório causado por: (a) banco de capacitores de 600 kVAr chaveado no ponto 2, no instante 0,12 s, (b) banco de capacitores de 600 kVAr chaveado no ponto 3, no instante 0,17 s, (c) banco de capacitores de 900 kVAr chaveado no ponto 4, no instante 0,3 s, (d) banco de capacitores de 900 kVAr chaveado no ponto 6, no instante 0,12 s

5.4.3 Caso 3 – Energização de transformadores

Para validação da técnica proposta diante dos transitórios causados pela energização de transformadores, o algoritmo foi testado com os cento e cinco casos

gerados. Desses casos, apenas o mostrado na tabela 5.7 não foi classificado pelo algoritmo.

Nesse caso o algoritmo detectou a ocorrência do transitório, mas não o classificou. Isso ocorreu porque o vetor de saída da GRNN obteve dois valores próximos a 0,5 o que demonstra incerteza na classificação, e para evitar uma atuação indevida, o algoritmo não classificou o transitório em nenhum dos tipos utilizados no treinamento da GRNN. Esses dois valores próximos a 0,5 ocorreram, pois o transitório foi detectado 18 amostras após ter ocorrido, isso gerou coeficientes de detalhe do primeiro nível diferentes daqueles utilizados para identificar a energização de transformadores no treinamento da GRNN. Entretanto, vale salientar que mesmo tendo algumas diferenças nos coeficientes de detalhe, a GRNN classificou corretamente o transitório, gerando um valor maior que 0,5 na linha referente a energização de transformadores de seu vetor de saída. Todavia, devido a lógica do algoritmo proposto, o transitório não foi classificado.

Tabela 5.7 - Principais resultados dos testes de energização de transformadores

Característica do Transitório	Saída do Detector de Transitórios (SIMNÃO)	Saída da GRNN (Capacitores FAI Transformadores)
Caso 1 - Transformador de 75 kVA chaveado na posição 5, instante 0,054 s	Sim	0 0,46 0,53

A figura 5.7 mostra os coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela de 128 amostras formada a partir do instante em que ocorreu o transitório do caso 1. Nessa se pode perceber que os coeficientes realmente estão entre aqueles utilizados no treinamento da GRNN para identificar faltas de alta impedância e os utilizados para identificar energização de transformadores. Essa comparação pode ser feita com auxílio da figura 4.7 do Capítulo 4.

Nos cento e três casos restantes o algoritmo detectou e classificou corretamente o transitório, sendo que o valor médio encontrado no vetor de saída da GRNN foi 0,81. Os bons resultados obtidos nesses testes mostram que a metodologia proposta é confiável, pois identifica corretamente os transitórios causados por energização de transformadores, assim evitando atuações indevidas.

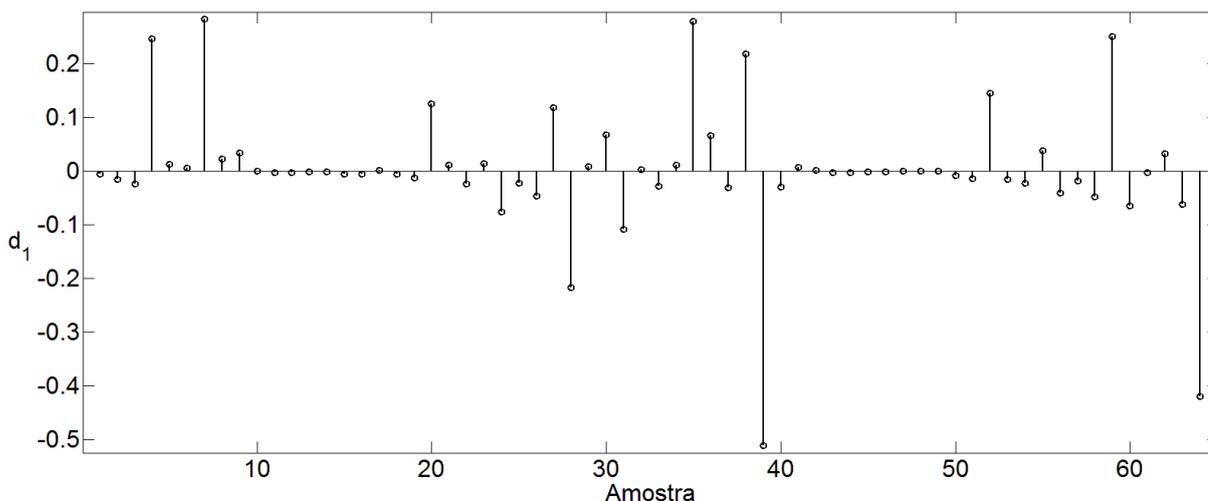


Figura 5.7 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível para o caso 1

5.4.4 Caso 4 – Falta de Alta Impedância

O algoritmo foi testado com os oitenta casos e em todas as situações o algoritmo detectou e classificou corretamente o transitório, independente do valor da resistência de falta e do curto-circuito ser do lado da carga ou da fonte. Vale salientar que o fato do algoritmo obter bons resultados tanto para curtos-circuitos do lado da fonte como do lado da carga, demonstra a robustez da técnica e também uma característica inovadora, pois a grande maioria dos trabalhos publicados sobre o assunto não levam em consideração essas duas situações.

O valor médio encontrado na segunda linha do vetor de saída da GRNN foi 0,95, o que demonstra que a assinatura utilizada para o treinamento da rede realmente se repete nos casos que envolvem FAI.

Os casos que geraram os seis menores valores na segunda linha do vetor de saída da GRNN são apresentados na tabela 5.8 juntamente com os valores de saída da GRNN e a resposta do detector de transitórios. Esses menores valores foram obtidos, porque em todos eles a falta incidiu na posição mais afastada da subestação. Essa distância, aliada a grande resistência de falta, gera correntes de curto-circuito ainda menores e conseqüentemente uma menor distorção nas correntes medidas na subestação. Entretanto, mesmo para essa situação o algoritmo detectou e classificou corretamente os transitórios.

Na figura 5.8 pode ser visto os coeficientes de detalhe do primeiro nível desses seis transitórios. Nessa figura, pode-se perceber a semelhança entre a janela

dos coeficientes de detalhe do primeiro nível dos transitórios causados pelas FAI, mesmo para faltas com impedâncias e instantes de incidências diferentes.

Tabela 5.8 - Principais resultados dos testes de falta de alta impedância

Característica do Transitório	Saída do Detector de Transitórios (SIMNÃO)	Saída da GRNN (Capacitores FAI Transformadores)
Caso 1 - Falta de alta impedância do lado da carga, no ponto 6, impedância de falta 350 Ω, instante 0,3 s	Sim	0 0,82 0,18
Caso 2 - Falta de alta impedância do lado da carga, no ponto 6, impedância de falta 350 Ω, instante 0,19 s	Sim	0 0,78 0,22
Caso 3 - Falta de alta impedância do lado da carga, no ponto 6, impedância de falta 350 Ω, instante 0,21 s	Sim	0 0,6 0,4
Caso 4 - Falta de alta impedância do lado da carga, no ponto 6, impedância de falta 350 Ω, instante 0,24 s	Sim	0 0,77 0,23
Caso 5 - Falta de alta impedância do lado da fonte, no ponto 6, impedância de falta 250 Ω, instante 0,14 s	Sim	0 0,72 0,28
Caso 6 - Falta de alta impedância do lado da fonte, no ponto 6, impedância de falta 350 Ω, instante 0,16 s	Sim	0 0,76 0,24

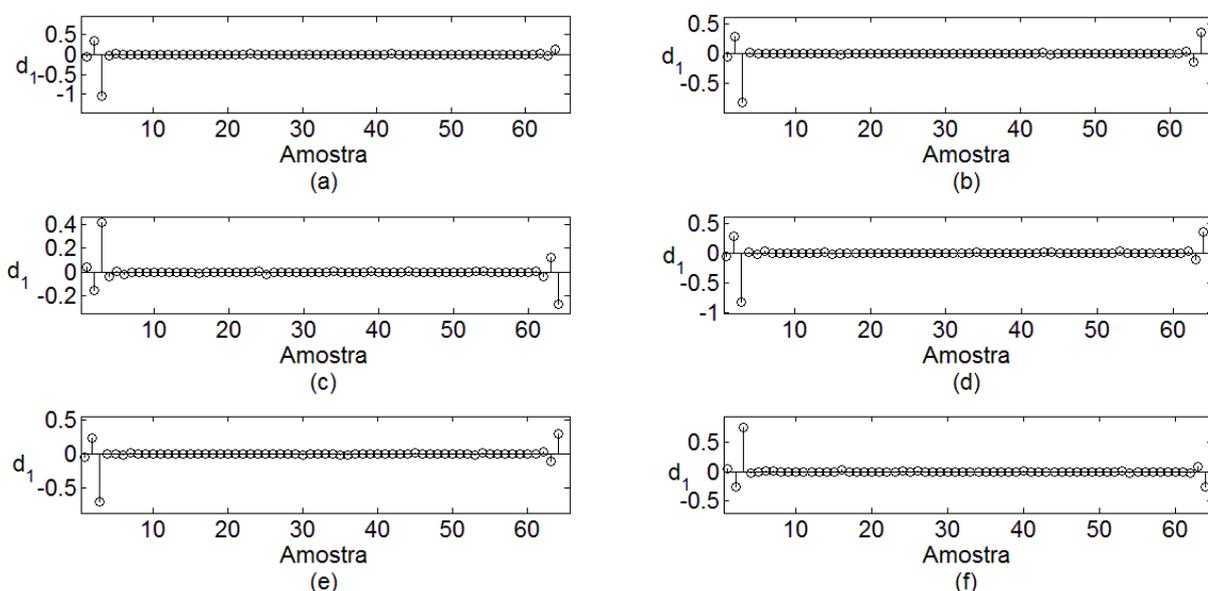


Figura 5.8 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela formada com as 128 primeiras amostras após o início do transitório. (a) caso 1, (b) caso (2), (c) caso 3, (d) caso 4, (e) caso 5, (f) caso 6.

5.5 Considerações Finais

Nesse capítulo foram apresentados o sistema teste e os transitórios utilizados no processo de validação do algoritmo proposto. A modelagem desses transitórios no software ATPDraw[®] também foi descrita. Foram gerados 397 casos distintos de transitórios sendo que, a posição de incidência, instante de incidência, potência dos equipamentos e resistência de falta foram variados.

O algoritmo proposto nesse trabalho respondeu adequadamente em 380 dos 397 casos gerados, o que representa 95,71% de acerto na detecção e classificação dos transitórios. O grande número de casos utilizados no processo de validação e os bons resultados alcançados demonstram a robustez da técnica proposta. Além disso, vale ressaltar que mesmo o algoritmo não detectando e classificando todos os 397 casos testados, nenhuma atuação indevida foi gerada. Esses resultados tornam interessante o uso da técnica em aplicações reais.

Os coeficientes de detalhe do primeiro nível dos casos testados, que não foram apresentados de forma gráfica nesse capítulo, podem ser vistos no Apêndice B. Entretanto, devido a limitação de espaço físico dessa dissertação, nesse apêndice são apresentados apenas 192 dos 397 casos gerados.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O presente trabalho abordou assuntos relacionados a falta de alta impedância em redes de distribuição. Ao longo do texto foram descritas as causas e consequências das FAI, bem como as características que a tornam de difícil detecção.

As técnicas de detecção de FAI que utilizam dispositivos mecânicos instalados no decorrer dos alimentadores, apesar de serem eficientes na detecção, possuem um custo financeiro para as distribuidoras muito elevado, sendo impraticável sua instalação em todo alimentador. Para contornar esses custos, nos últimos anos alguns algoritmos que utilizam apenas sinais de corrente medidos na subestação vem se destacando. Entretanto, muitos deles geram atuações indevidas devido a transitórios que são normais nos alimentadores, ou ainda utilizam uma frequência de amostragem muito elevada, o que inviabiliza sua implementação nos processadores numéricos atuais de proteção.

Neste sentido, o presente trabalho apresentou um novo algoritmo para detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica. A principal vantagem do método é o fato de também detectar e classificar outros tipos de transitórios o que reduz consideravelmente as atuações indevidas causadas por chaveamentos normais dos alimentadores. Outra vantagem é a utilização apenas dos sinais de corrente já medidos na subestação ou nos religadores. Isso faz com que não seja necessária a instalação de equipamentos adicionais nos alimentadores, tornando o custo de implementação relativamente baixo, quando comparado a outras técnicas de detecção.

A metodologia proposta faz uso de uma rede neural do tipo GRNN que foi previamente treinada com as assinaturas de diversos transitórios oriundos de chaveamentos e também daqueles causados por faltas de alta impedância. Essa rede é utilizada para classificar o transitório após ele ter sido detectado pelo algoritmo de detecção. Esse algoritmo de detecção faz uso do sinal de detalhe da TWD extraído do sinal de erro do PLL. Um valor de th que se ajusta automaticamente ao sinal é utilizado como limiar de disparo do detector. Esse tipo

de ajuste torna o algoritmo mais robusto, pois não precisa ser redefinido quando utilizado em sistemas diferentes daquele em que foi validado.

O desempenho do algoritmo proposto foi avaliado em uma série de testes com diferentes cenários de falta de alta impedância e de transitórios normais. Os bons resultados obtidos demonstram que as assinaturas extraídas do sinal de erro do PLL realmente se repetem nos transitórios gerados pela mesma causa. Apesar de o algoritmo não ter classificado corretamente todos os casos testados, nenhuma atuação indevida foi gerada, ou seja, em nenhum momento o algoritmo classificou um transitório como FAI o que iria gerar um desligamento indevido. Esses resultados aliados a simplicidade do método, a baixa frequência de amostragem utilizada e a não necessidade de instalação de equipamentos adicionais nos alimentadores, torna a técnica promissora para aplicações reais.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Considerando-se os resultados aqui obtidos e discutidos, sugerem-se os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Validação da metodologia realizando estudos de caso com base em dados obtidos de alimentadores reais;
- Desenvolver um algoritmo para localização de faltas de alta impedância em redes de distribuição;
- Estudo do desempenho da metodologia diante da inserção da geração distribuída;
- Análise do desempenho do algoritmo proposto diante de manobras de deslocamento de carga entre alimentadores (anéis);
- Estudo do comportamento do algoritmo proposto diante de sistemas com fontes geradoras de conteúdos harmônicos, como cargas não lineares;
- Implementação do software em um hardware.

6.3 Contribuições Originais

Considera-se que o trabalho desenvolvido apresentou as seguintes contribuições:

- Método inovador e de baixo custo para detecção, em redes de distribuição, de faltas de alta impedância do lado da carga e do lado da fonte;
- Desenvolvimento de um classificador de transitórios para redes de distribuição;
- Técnica para detecção de faltas de alta impedância e classificação de transitórios utilizando frequência de amostragem adequada para aplicação nos processadores numéricos atuais;
- Metodologia para detecção de faltas de alta impedância e classificação de transitórios que utiliza dados de corrente já adquiridos pelos processadores numéricos instalados nas subestações ou em religadores.
- Utilização de uma rede neural com treinamento em um único passo para classificação de transitórios.

6.4 Publicações

Sobre o tema proposto por esse trabalho, as seguintes publicações foram geradas durante o período de elaboração dessa dissertação:

FARIAS, P. E., CARDOSO JR, G., DEIFELT, S. V. UM NOVO MÉTODO PARA DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS, **Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ**, 2013, Foz do Iguaçu.

FARIAS, P. E., CARDOSO JR, G., DEIFELT, S. V., OLIVEIRA, A. L. Detecção e Classificação de Transitórios Elétricos em Redes de Distribuição para Identificação de Faltas de Alta Impedância por meio do PLL, Transformada Wavelet Discreta e Redes Neurais Artificiais, **10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications**, 2012, Fortaleza.

REFERÊNCIAS

Baqui, I. et al. High Impedance Fault Detection Methodology Using Wavelet Transform and Neural Artificial Networks, **Electric Power Systems Research**, 2011

Best, R. E. **Phase-Locked Loops – Design, Simulation and Applications**, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2003

Bo, Z. Q. et al. Detection of High Impedance Fault using Adaptive Non-communication Protection Technique, **Power Engineering Society Summer Meeting**, p. 376 – 381, vol. 1, 2002

CESP. **Subestação de Conchas – Ensaio de Curto-Circuito: Parte-I. Ilha Solteira**, 1985 (COM-00-14-03)

Chaves, M. L. R. Modelagem de Transformadores e Reatores com Entreferro, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, 2012 disponível em:
<http://www.feelt.ufu.br/pastas/Transitorios/Modelagem_de_transformadores.pdf >
Acesso em: 24/01/2013

Costa, F. B. et al. Transformada Wavelet Discreta Aplicada ao Diagnostico de Disturbios. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE**, maio 2010

Daubechies, I. **Ten Lectures on Wavelets**. Philadelphia, USA: CBMSNSF Regional Conference Series, SIAM, 1992.

Elkalashy, N. I. et al. DWT-based extraction of residual currents throughout Unearthed MV Networks for Detection High-Impedance Faults due to Leaning Trees. **Europe Transactions on Electrectrical Power**, January 2007.

Emanuel, A. E. et al. High impedance fault arcing on Sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.5, n.2, p.676-686, Abril 1990

Emanuel, A. E. et al. High Impedance Fault Arcing on Sandy Soil in 15kV Distribution Feeders: Contributions to the Evalution of the Low Frequency Spectrum, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 5, no. 2, April 1990

Gautam, S.; Brahma, S. M. Detection of High Impedance Fault in Power Distribution Systems Using Mathematical Morphology, **IEEE Transactions on Power Systems**, 2012

Ghaffarzadeh, N.; Vahidi, B.; A New Protection Scheme for High Impedance Fault Detection using Wavelet Packet Transform, **Advances in Electrical and Computer Engineering**, vol. 10, n. 3, 2010

Guerra, F. C.; Araújo, L. L.; Medeiros, L. D. C. Correntes Transitórias de Magnetização em Transformadores de Potência, **VIII Conferencia Brasileira sobre Qualidade de Energia**, Blumenau, 2009

Hou, D. Detecção de Faltas de Alta Impedância nos Sistemas de Distribuição de Energia, **Schweitzer Engineering Laboratories, Comercial LTDA**, 2006.

Hou, D. Detection of High-Impedance Faults in Power Distribution Systems, **Schweitzer Engineering Laboratories, Comercial LTDA - SEL**, 2007

Keyhani, R.; Deriche, M.; Palmer, E. A High Impedance Fault Detector Using a Neural Network and Subband Decomposition, **International Symposium on Signal Processing and its Application**, Australia 2001.

Keyhani, R.; Deriche, M.; Palmer, E. A high impedance fault detector using a neural network and subband decomposition, **VI International Symposium on Signal Processing and its Applications**, 2001.

Lai, T. M. et al. High-Impedance Fault Detection Using Discrete Wavelet Transform and Frequency Range and RMS Conversion, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 20, No. 1, January 2005.

Machado, R. N. D. M. et al. Use of Wavelet Transform and Generalized Regression Neural Network (GRNN) to the Characterization of Short-Duration Voltage Variation in Electric Power System. **IEEE Latin America Transactions**, Vol. 7, NO. 2, June 2009.

Mallat, S. G. "A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation," **IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, vol. 11, no. 7, Jul 1989.

Michalik, M. et al. New ANN-Based Algorithms for Detecting HIFs in Multigrounded MV Networks, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 23, No. 1, January 2008.

Milioudis, A. N.; Andreou, G. T.; Labridis, P. D. Enhanced Protection Scheme for Smart Grid Using Power Communication Techniques – Part I: Detection of High Impedance Fault Occurrence, **IEEE Transactions on Smart Grid**, vol. 3, no.4, December 2012

Nakagomi, R. M. **Proposição de um Sistema para Simulação de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição**, 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006

Nan, S. R. et al. A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP. **Summer Meeting 2001: IEEE Press**, 2001. p. 1175-1180

Ohrstrom, M.; Soder, L. Fast Protection of Strong Power Systems With Fault Current Limiters and PLL-Aided Fault Detection, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 26, No. 3, July 2011

Oliveira, H. M. **Análise de Sinais para Engenheiros: Uma abordagem via Wavelets**, Brasport Livros e Multimídia, Rio de Janeiro, 2007. cap. 2, p. 41-62

Oppenheim, A. V.; Schafer, R. W. "Discrete-time signal processing," 1989

Pasquali, L. **A Curva Normal**, 2006, disponível em: <http://www.psi-ambiental.net/pdf/PasqCap03.pdf>

Penteado Neto, R. A. **Sistemas para Detecção de Falta de Alta Impedância e de Rompimento de condutores em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**, 2005. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005

Russel, B. D. Detection of Downed Conductors on Utility Distributions Systems. **IEEE PES Tutorial Course 90EH0310-3-PWR**, 1989

Samantaray, S. R.; Dash, P. K. High Impedance Fault Detection in Distribution Feeders Using Extended Kalman Filter and Support Vector Machine, **European Transactions On Electrical Power**, January 2010

Samantaray, S. R.; Dash, P. K.; Upadhyay, S. K. Adaptive Kalman Filter and Neural Network Based High Impedance Fault Detection in Power Distribution Networks, **Electrical Power and Energy Systems**, 2009.

Samantaray, S. R.; Panigrahi, B. K.; Dash, P. K. High Impedance Fault Detection in Power Distribution Networks Using Time-Frequency Transform and Probabilistic Neural Network, **IET Generation, Transmission e Distribution**, 2008.

Sarlak, M.; Shahrtash, S. M. High Impedance Fault Detection Using Combination of Multi-layer Perceptron Neural Networks Based on Multi-Resolution Morphological Gradient Features of Current Waveform, **IET Generation, Transmission e Distribution**, 2010

Sarlak, M.; Shahrtash, S. M. SVM Based Method for High-Impedance Faults Detection in Distribution Networks, **The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, Vol. 30, No.2, p. 431-450, 2011.

Sedighi, A. R. et al. High Impedance Fault Detection Based on Wavelet Transform and Statistical Pattern Recognition, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 20, No. 4, October 2005.

Sedighzadeh, M.; Rezazadeh, A.; Elkalashy, N. I. Approaches in High Impedance Fault Detection a Chronological Review, **Advances in Electrical and Computer Engineering**, vol. 10, n. 3, 2010

Senger, C. E.; Pellini, E. L.; Manassero, G. J. Proposta de Proteção de Alta Sensibilidade para Detecção de Falta de Alta Impedância, **X Seminário Técnico de Proteção e Controle – STPC**, 2010.

Senger, E. C.; Pellini, E. L.; Manassero Junior, G. Proposta de Proteção de Alta Sensibiliadde para Detecção de Falta de Alta Impedância, **X Seminário Técnico de Proteção e Controle**, Recife, 2010.

Sharaf, A. M.; Snider, L. A.; Debnath, K. A Third Harmonic Sequence ANN Based Detection Scheme for High Impedance Faults, **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1993

Sharaf, A. M.; Wang, G. High Impedance Fault Detection Using Feature-Pattern Based Relaying, **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2003

Sharaf, A. M.; Wang, G. High Impedance Faut detection Using Feature-Pattern Based Relaying. **Transmission and Distribution Conference and Exposition**, 2003

Specht, D. F. A General Regression Neural Network, **IEEE Transactions on Neural Networks**, Vol. 2. No. 6, November 1991

Tengdin, J. et al. High Impedance Fault Detection Technology, **Report of PSRC Working Group D15**, March 1996

Vico, K. et al. High Impedance Fault Detection On Rural Electric Distribution Systems, **Rural Electric Power Conference (REPC)**, 2010

Wester, C. G. High Impedance Fault Detection on Distribution Systems. **GE Power Management**, 1998.

Xianghun, Z.; li, K. K.; Chan, W. L. Wavelet analysis based protection for high impedance ground fault in supply systems, **International Conference on Power System Technology**, China, 2002

Xiangjun, Z. et al. Novel techniques for earth fault feeder detection based on negative sequence current in industry power systems, **Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual meeting. Conference Record of the 2001 IEEE**, p. 1831 – 1837, vol. 3, 2001

Xu, Z. Y. et al. Ground Distance Relaying Algorithm for High Resistance fault, **IET Generation, Transmission e Distribution**, 2010

Yang, M. T. et al. Detection High Impedance Fault in Distribution Feeder Using Wavelet Transform and Artificial Neural Networks, **Power System Technology – POWERCON**, 2004.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Algoritmo implementado em MODELS para modelos de falta de alta impedância

MODEL Rfault

```
comment *****
*
* Função: modelo de falta de alta impedância
* Entrada : tensão no ponto de falta
* Saída : resistência de falta
*
***** endcomment
```

INPUT V

```
DATA Rfalta -- Resistencia de falta [ohm]
      Vnomin -- Tensao de fase [V]
      DT -- Intervalo entre amostras
      SFault -- Se =0 Falta do lado da carga
              -- Se =1 Falta do lado da fonte
              -- Se =2 Não ocorre a falta
      InsF -- Instante em que a falta ocorre (segundos)
```

VAR

```
lq
R1
VUP[1..28]
IUP[1..28]
VDOWN[1..28]
IDOWN[1..28]
j
k
G
```

Posv
Posv
Ibase
Vbase
Rbase
I
IDER1
timex
R2
RFAULT
FaultC
FaultF
NFault
timex2
OUTPUT Rfault
NFault
FaultC
FaultF
INIT IDER1:=0
timex:=0
Faultc:=1
FaultF:=1
NFault:=-1
timex2:=0
ENDINIT
EXEC

Vbase:=Vnomin

Ibase:=Vbase/Rfalta

VUP[1] := -13.644122

IUP[1] := -198.544131

VUP[2] := -13.340064

IUP[2] := -196.141947
VUP[3] := -12.830094
IUP[3] := -188.444040
VUP[4] := -12.118059
IUP[4] := -176.396724
VUP[5] := -11.302106
IUP[5] := -160.509554
VUP[6] := -10.234054
IUP[6] := -138.835305
VUP[7] := -9.012049
IUP[7] := -116.687898
VUP[8] := -7.586055
IUP[8] := -90.700637
VUP[9] := -6.110027
IUP[9] := -62.766151
VUP[10] := -4.276056
IUP[10] := -38.689718
VUP[11] := -2.494045
IUP[11] := -17.015469
VUP[12] := -0.662000
IUP[12] := -4.021838
VUP[13] := 0.101994
IUP[13] := -0.163785
VUP[14] := 1.935964
IUP[14] := 5.131938
VUP[15] := 3.463952
IUP[15] := 10.900819
VUP[16] := 4.939981
IUP[16] := 18.125569
VUP[17] := 6.314015
IUP[17] := 28.717015
VUP[18] := 7.638014
IUP[18] := 42.202002

VUP[19] := 8.809985
IUP[19] := 60.491356
VUP[20] := 9.878037
IUP[20] := 81.201092
VUP[21] := 10.948013
IUP[21] := 104.786169
VUP[22] := 11.660048
IUP[22] := 127.898089
VUP[23] := 12.476001
IUP[23] := 149.099181
VUP[24] := 12.984047
IUP[24] := 165.950864
VUP[25] := 13.544053
IUP[25] := 178.471338
VUP[26] := 13.800000
IUP[26] := 187.606915
VDOWN[1] := 13.800000
IDOWN[1] := 195.323021
VDOWN[2] := 13.290029
IDOWN[2] := 186.169245
VDOWN[3] := 12.730024
IDOWN[3] := 176.050955
VDOWN[4] := 11.864036
IDOWN[4] := 160.163785
VDOWN[5] := 10.846019
IDOWN[5] := 141.874431
VDOWN[6] := 9.624014
IDOWN[6] := 119.235669
VDOWN[7] := 8.198020
IDOWN[7] := 93.230209
VDOWN[8] := 6.619997
IDOWN[8] := 68.680619
VDOWN[9] := 5.041975

IDOWN[9] := 43.166515
VDOWN[10] := 3.055976
IDOWN[10] := 21.019108
VDOWN[11] := 1.171970
IDOWN[11] := 2.711556
VDOWN[12] := -0.508046
IDOWN[12] := -7.388535
VDOWN[13] := -2.290057
IDOWN[13] := -12.211101
VDOWN[14] := -3.868080
IDOWN[14] := -17.506824
VDOWN[15] := -5.192079
IDOWN[15] := -26.169245
VDOWN[16] := -6.670032
IDOWN[16] := -38.216561
VDOWN[17] := -7.790043
IDOWN[17] := -51.210191
VDOWN[18] := -8.910055
IDOWN[18] := -69.990901
VDOWN[19] := -9.978106
IDOWN[19] := -89.736124
VDOWN[20] := -10.844094
IDOWN[20] := -111.938126
VDOWN[21] := -11.760117
IDOWN[21] := -133.539581
VDOWN[22] := -12.372082
IDOWN[22] := -154.249318
VDOWN[23] := -12.982123
IDOWN[23] := -170.627843
VDOWN[24] := -13.340064
IDOWN[24] := -182.656961
VDOWN[25] := -13.594087
IDOWN[25] := -192.283894

```
VDOWN[26] := -13.594087
IDOWN[26] := -200.000000
IF Sfault=2 then
    NFault:=-1
    FaultC:=1
    FaultF:=1
    Rfault:=10
endif
if timex>InsF and Sfault<>2 then
    IF Sfault=0 then
        FaultF:=-1
        FaultC:=1
        NFault:=1
    endif
    IF Sfault=1 then
        FaultC:=-1
        FaultF:=1
        NFault:=1
    endif
--Colocar curva em pu
    for j:=27 to 2 by -1 do
        VUP[j]:=1000*VUP[j-1]
        IUP[j]:=IUP[j-1]
        VDOWN[j]:=1000*VDOWN[j-1]
        IDOWN[j]:=IDOWN[j-1]
    endfor
    Vup[1]:=Vup[2]*1.3
    Iup[1]:=Iup[2]*1.3
    Vup[28]:=Vup[27]*1.3
    Iup[28]:=Iup[27]*1.3
    Vdown[1]:=Vdown[2]*1.3
    Idown[1]:=Idown[2]*1.3
    Vdown[28]:=Vdown[27]*1.3
```

```

ldown[28]:=ldown[27]*1.3
for j:=1 to 28 do
    VUP[j]:=(VUP[j]/13800)*Vbase
    IUP[j]:=(IUP[j]/200)*Ibase
    VDOWN[j]:=(VDOWN[j]/13800)*Vbase
    IDOWN[j]:=(IDOWN[j]/200)*Ibase
endfor
IF (V-IDER1)>=0 THEN
    for j:=1 to 27 DO
        IF V>=VUP[j] and V<=VUP[j+1] then
            Posv:=j
        ENDIF
    ENDFOR
    I:=IUP[Posv+1]-IUP[Posv]
    I:=I/(VUP[Posv+1]-VUP[Posv])
    I:=I*(V-VUP[Posv])
    I:=IUP[Posv]+I
ENDIF
IF (V-IDER1)<0 THEN
    for j:=1 to 27 DO
        IF V<=VDOWN[j] and V>=VDOWN[j+1] then
            Posv:=j
        ENDIF
    ENDFOR
    I:=IDOWN[Posv+1]-IDOWN[Posv]
    I:=I/(VDOWN[Posv+1]-VDOWN[Posv])
    I:=I*(V-VDOWN[Posv])
    I:=IDOWN[Posv]+I
ENDIF
IDER1:=V
R1:=abs(V/I)
--Calcula R2
R2:=10*Rfalta*2.9030970612*EXP(-0.2731517629*(timex2*25/(0.800)))

```

```
--Calcula Rfault
      Rfault:=R1+R2
      timex2:=timex2+DT
endif
if timex<lnsf and Sfault<>2 then
      NFault:=-1
      FaultC:=1
      FaultF:=1
      Rfault:=10
endif
timex:=timex+DT
-----
ENDEXEC
ENDMODEL
```

APÊNDICE B – Resultados obtidos nos testes realizados com o algoritmo proposto

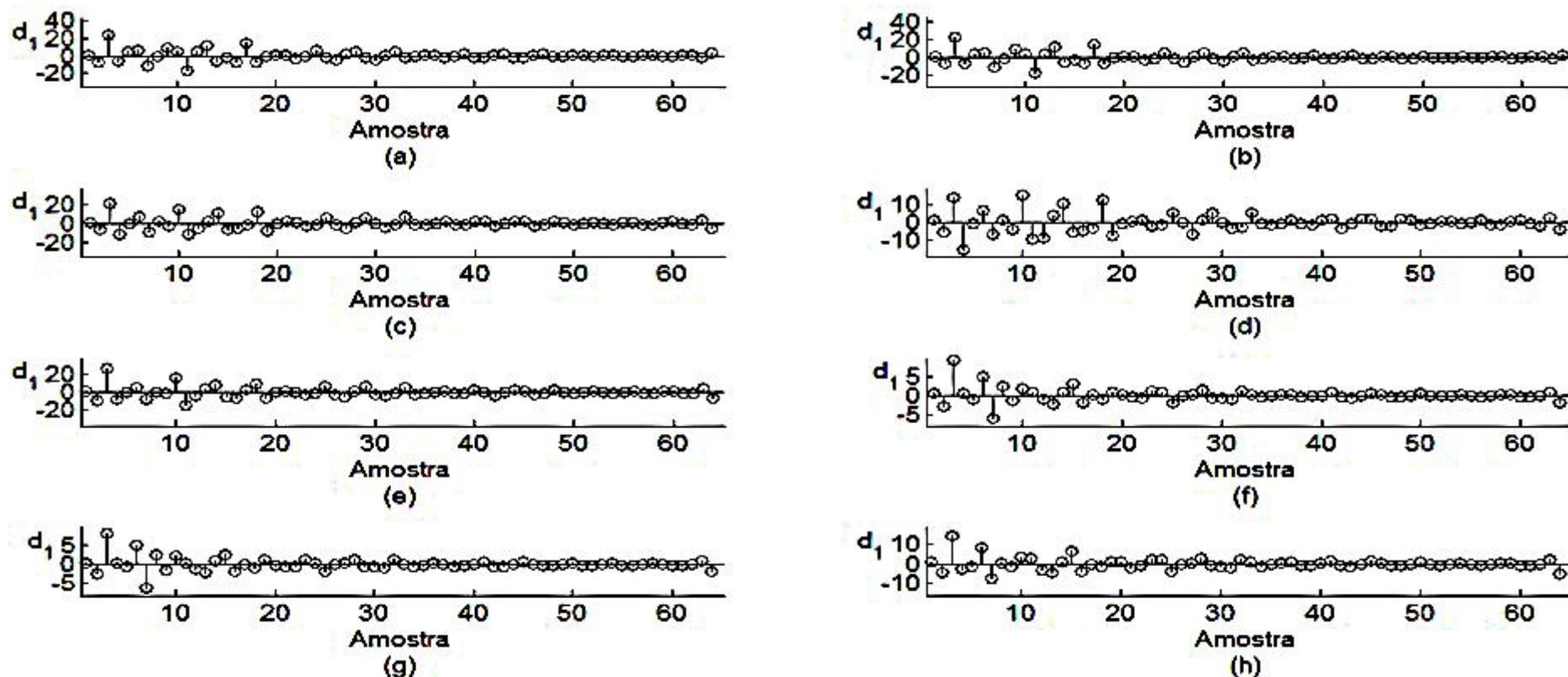


Figura A - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por energização de banco de capacitores de: (a) 600 kVAr, chaveado no ponto 2, instante 0,12 s (b) 600 kVAr, chaveado no ponto 2, instante 0,17 s (c) 600 kVAr, chaveado no ponto 1, instante 0,20 s, (d) 600 kVAr, chaveado no ponto 1, instante 0,03 s, (e) 600 kVAr, chaveado no ponto 1, instante 0,12 s, (f) 600 kVAr, chaveado no ponto 3, instante 0,10 s, (g) 600 kVAr, chaveado no ponto 3, instante 0,17 s, (h) 600 kVAr, chaveado no ponto 3, instante 0,19 s.

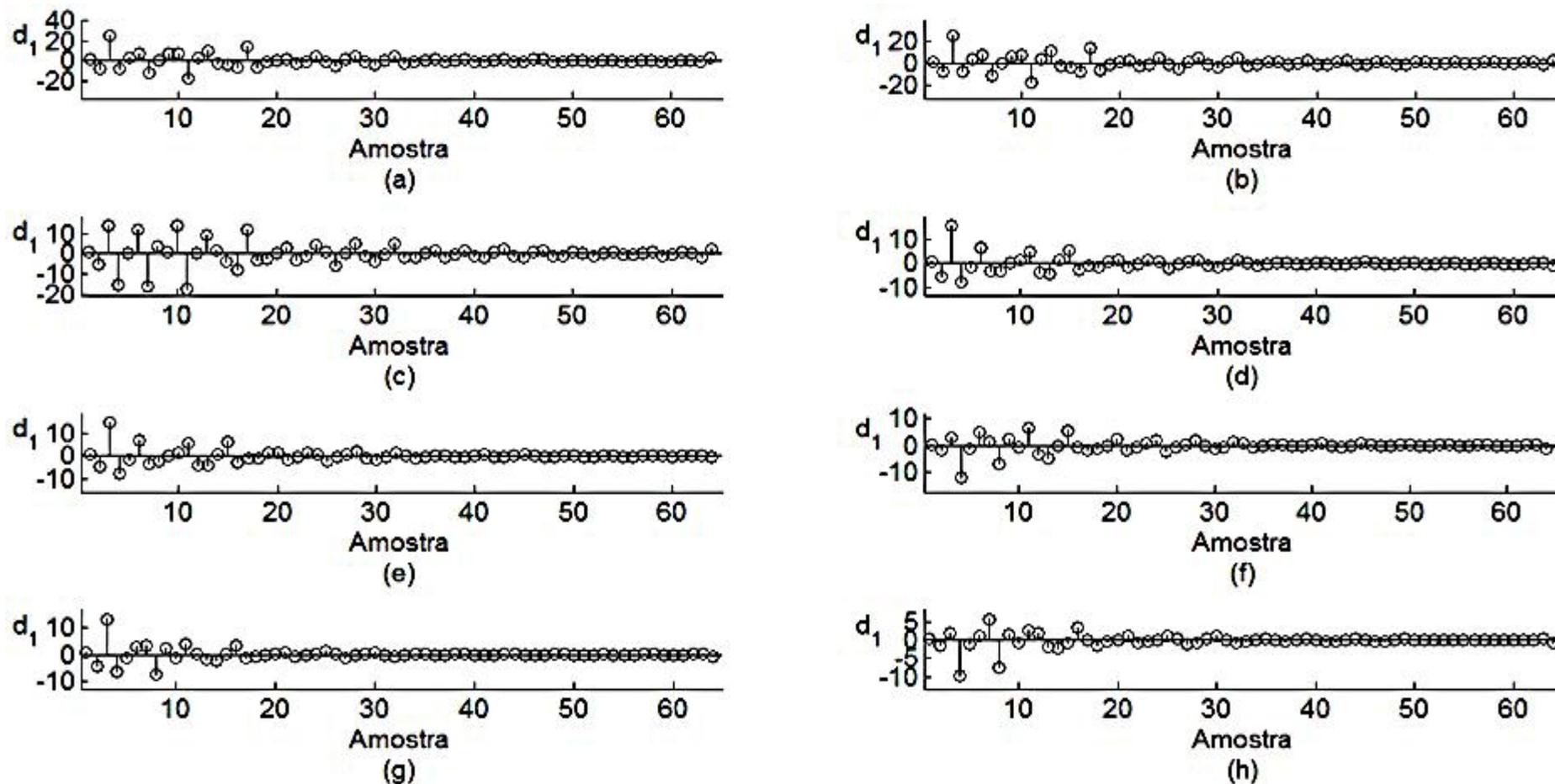


Figura B - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por energização de banco de capacitores de: (a) 600 kVAr, chaveado no ponto 4, instante 0,12 s (b) 600 kVAr, chaveado no ponto 4, instante 0,17 s (c) 600 kVAr, chaveado no ponto 4, instante 0,23 s, (d) 600 kVAr, chaveado no ponto 5, instante 0,30 s, (e) 600 kVAr, chaveado no ponto 5, instante 0, 17 s, (f) 600 kVAr, chaveado no ponto 5, instante 0,26 s, (g) 600 kVAr, chaveado no ponto 5, instante 0,3 s, (h) 600 kVAr, chaveado no ponto 6, instante 0,21 s.

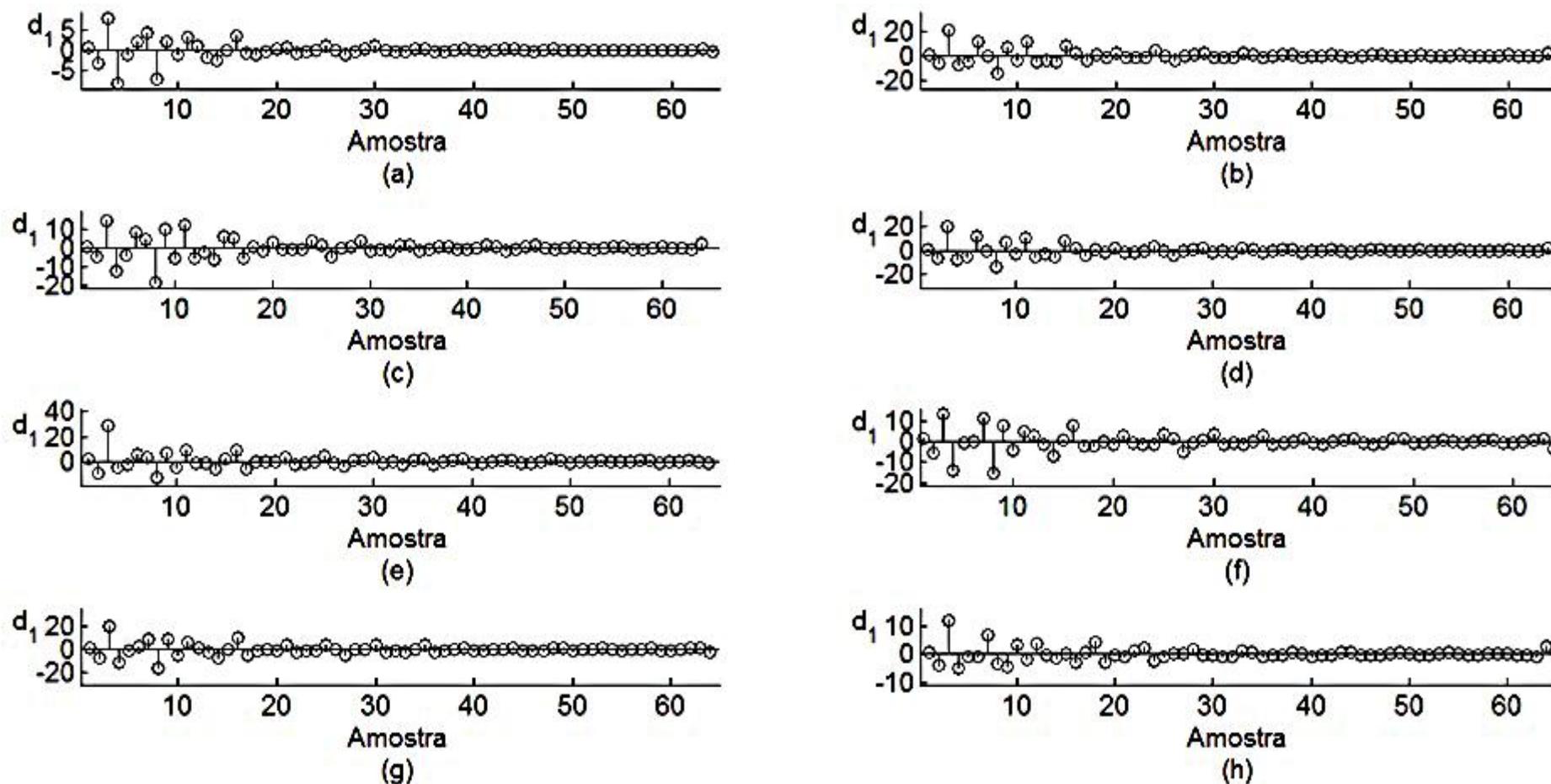


Figura C - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por energização de banco de capacitores de: (a) 600 kVAr, chaveado no ponto 6, instante 0,28 s (b) 900 kVAr, chaveado no ponto 2, instante 0,3 s (c) 900 kVAr, chaveado no ponto 2, instante 0,08 s, (d) 900 kVAr, chaveado no ponto 2, instante 0,15 s, (e) 900 kVAr, chaveado no ponto 1, instante 0,24 s, (f) 900 kVAr, chaveado no ponto 1, instante 0,08 s, (g) 900 kVAr, chaveado no ponto 1, instante 0,3 s, (h) 900 kVAr, chaveado no ponto 3, instante 0,3 s.

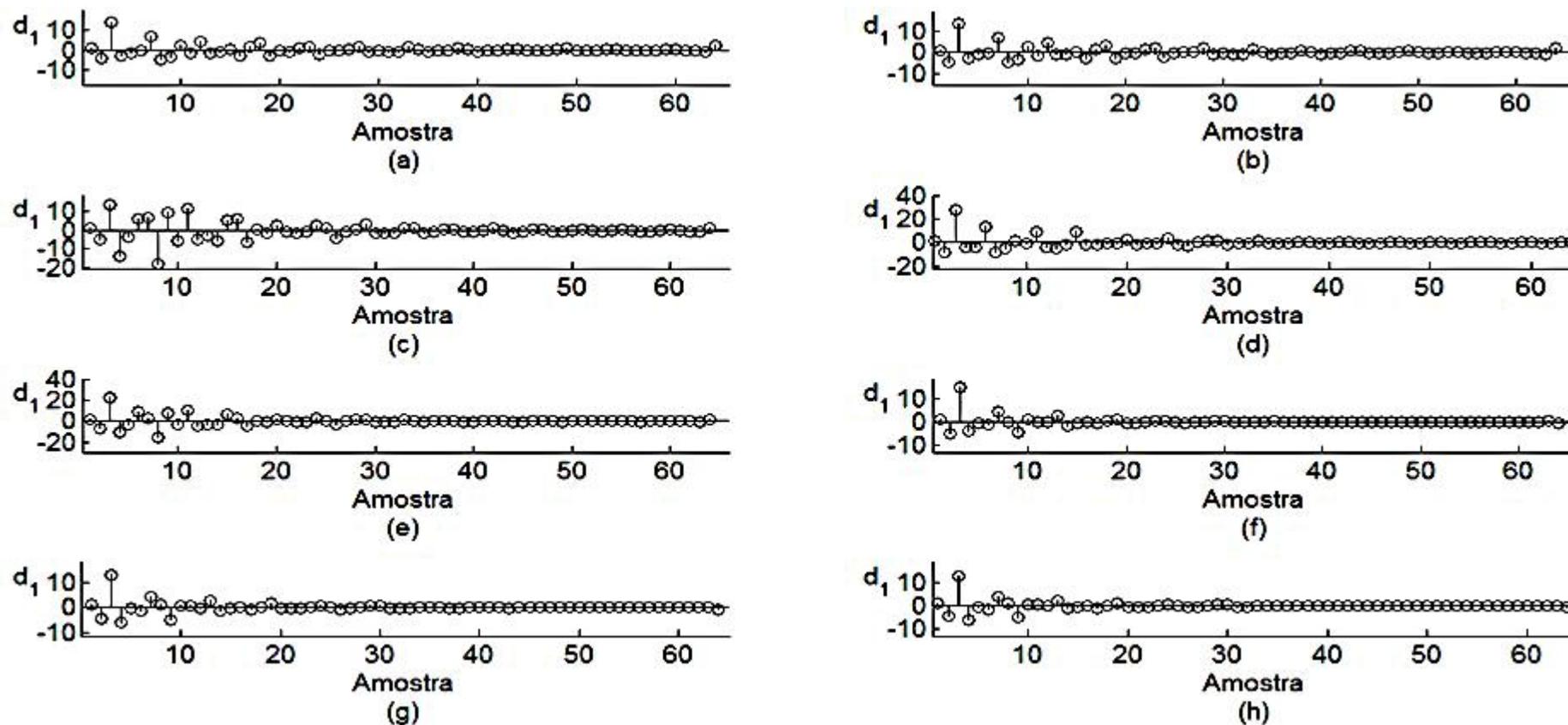


Figura D - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por energização de banco de capacitores de: (a) 900 kVAr, chaveado no ponto 3, instante 0,07 s (b) 900 kVAr, chaveado no ponto 3, instante 0,12 s (c) 900 kVAr, chaveado no ponto 4, instante 0,13 s, (d) 900 kVAr, chaveado no ponto 4, instante 0,04 s, (e) 900 kVAr, chaveado no ponto 4, instante 0,3 s, (f) 900 kVAr, chaveado no ponto 6, instante 0,12 s, (g) 900 kVAr, chaveado no ponto 6, instante 0,05 s, (h) 900 kVAr, chaveado no ponto 6, instante 0,3 s.

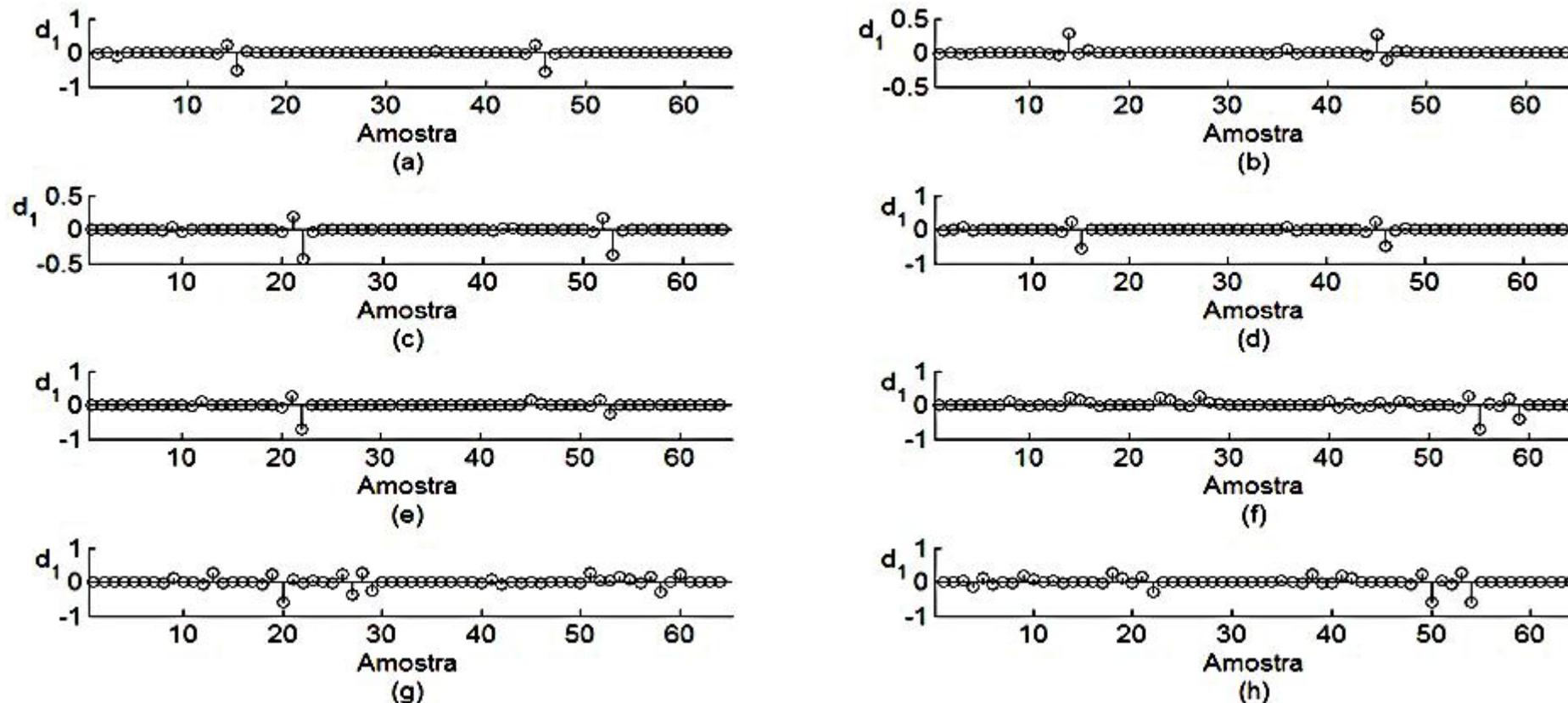


Figura E - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por energização transformador de: (a) monofásico 25 kVA, chaveado no ponto 2, instante 0,07 s (b) monofásico 25 kVA, chaveado no ponto 1, instante 0,08 s (c) monofásico 25 kVA, chaveado no ponto 3, instante 0,12 s, (d) monofásico 25 kVA, chaveado no ponto 4, instante 0,12 s, (e) monofásico 25 kVA, chaveado no ponto 6, instante 0,36 s, (f) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 2, instante 0,22 s, (g) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 2, instante 0,28 s, (h) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 1, instante 0,12 s.

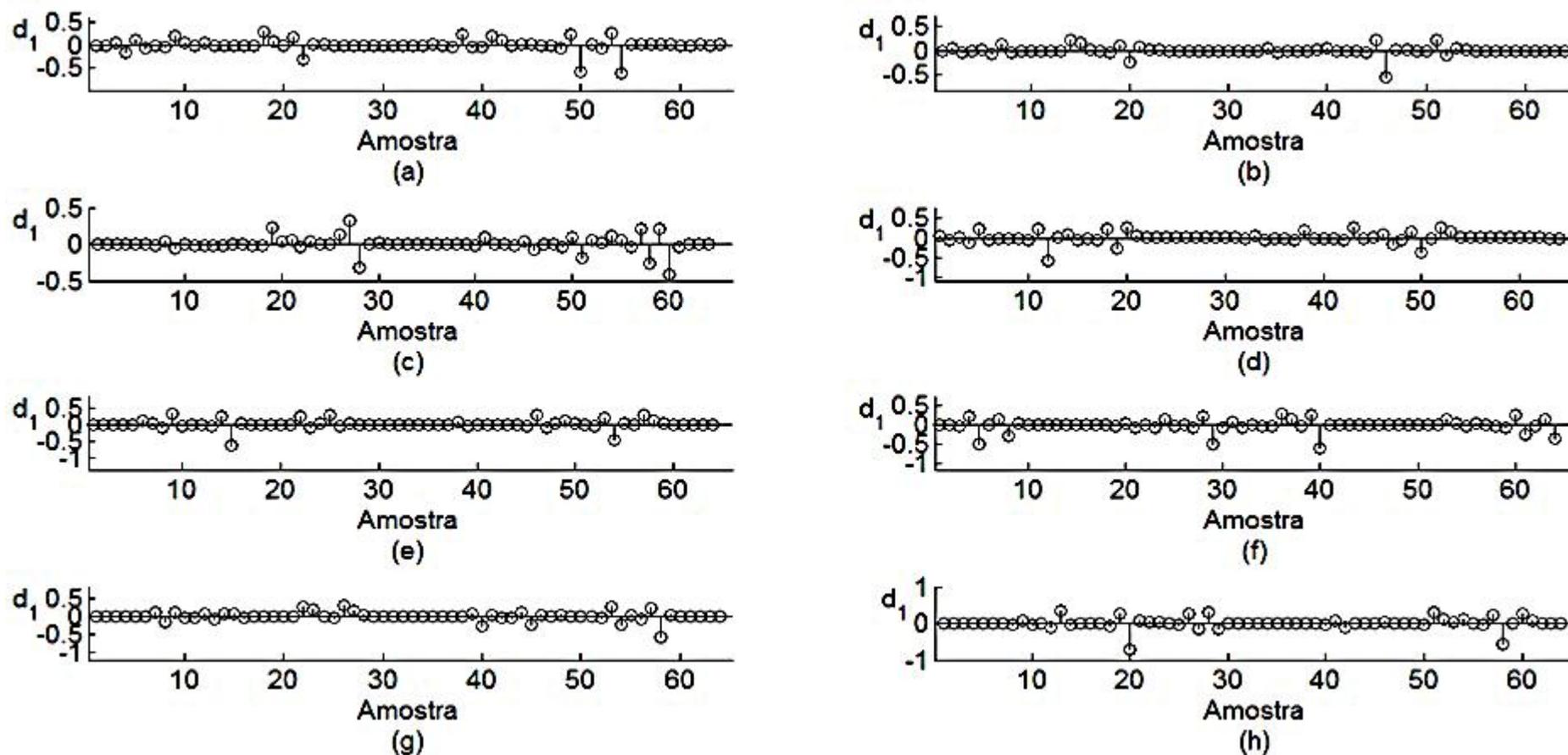


Figura F - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por energização transformador de: (a) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 1, instante 0,22 s (b) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 3, instante 0,06 s (c) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 3, instante 0,23 s, (d) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 4, instante 0,03 s, (e) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 4, instante 0, 2 s, (f) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 4, instante 0,06 s, (g) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 5, instante 0,22 s, (h) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 5, instante 0,08s.

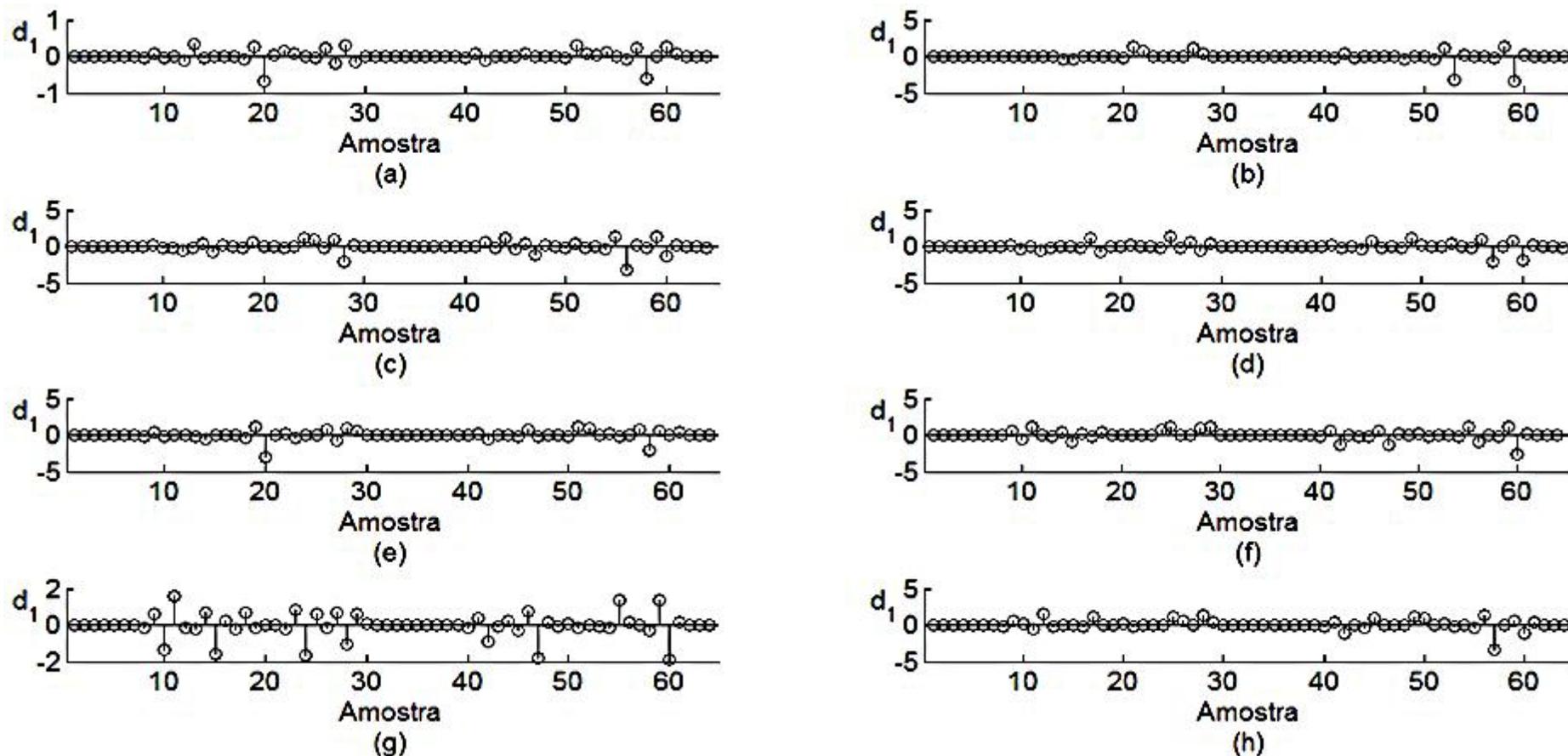


Figura G - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por energização transformador de: (a) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 6, instante 0,23 s (b) trifásico 300 kVA, chaveado no ponto 2, instante 0,11 s (c) trifásico 300 kVA, chaveado no ponto 1, instante 0,12 s, (d) trifásico 300 kVA, chaveado no ponto 1, instante 0,20 s, (e) trifásico 300 kVA, chaveado no ponto 3, instante 0,13 s, (f) trifásico 300 kVA, chaveado no ponto 3, instante 0,22 s, (g) trifásico 300 kVA, chaveado no ponto 4, instante 0,12 s, (h) trifásico 300 kVA, chaveado no ponto 4, instante 0,20 s.

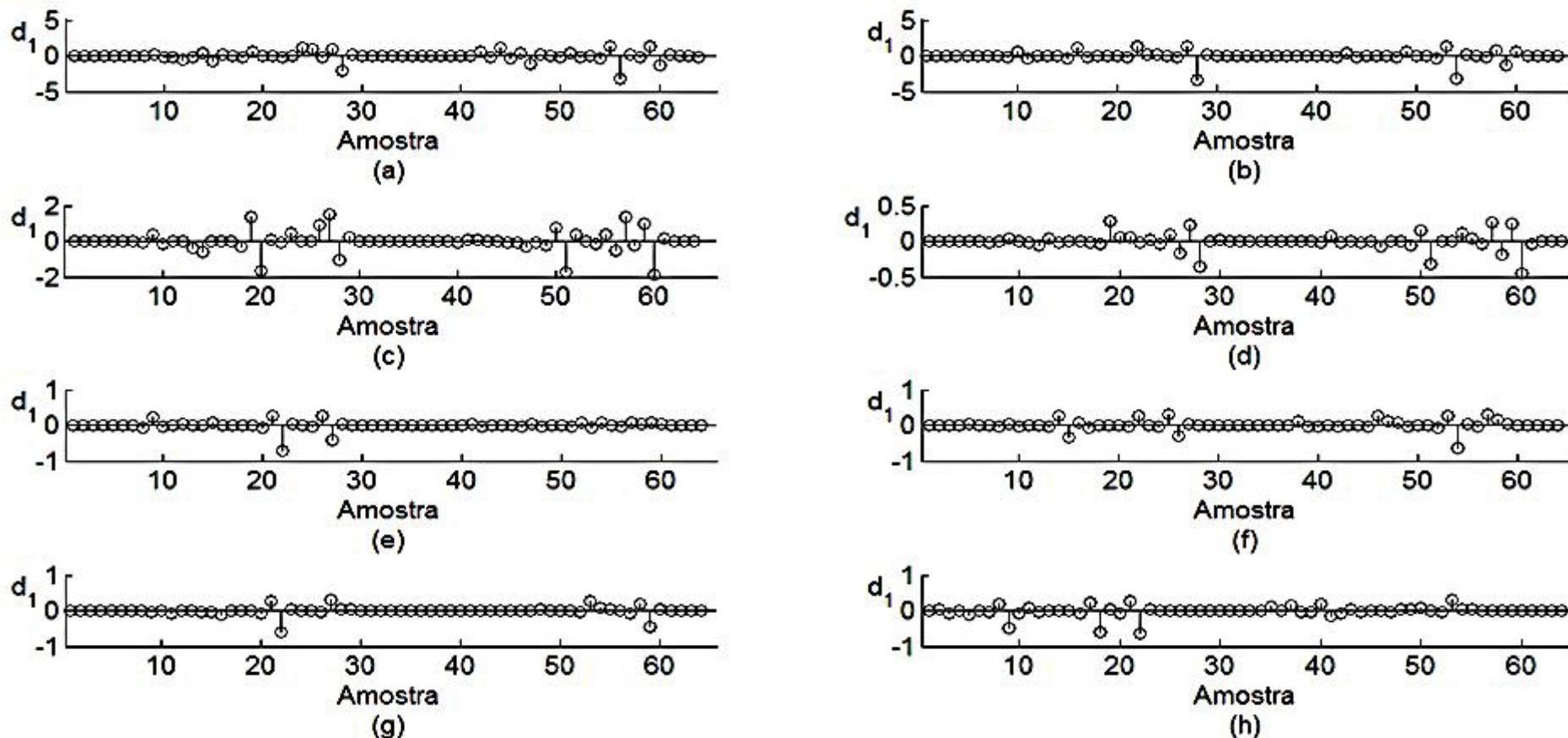


Figura H - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por energização transformador de: (a) trifásico 300 kVA, chaveado no ponto 1, instante 0,12 s (b) trifásico 300 kVA, chaveado no ponto 5, instante 0,30 s (c) trifásico 300 kVA, chaveado no ponto 6, instante 0,16 s, (d) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 12, instante 0,28 s, (e) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 5, instante 0,14 s, (f) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 6, instante 0,20 s, (g) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 1, instante 0,41 s, (h) trifásico 75 kVA, chaveado no ponto 4, instante 0,07s.

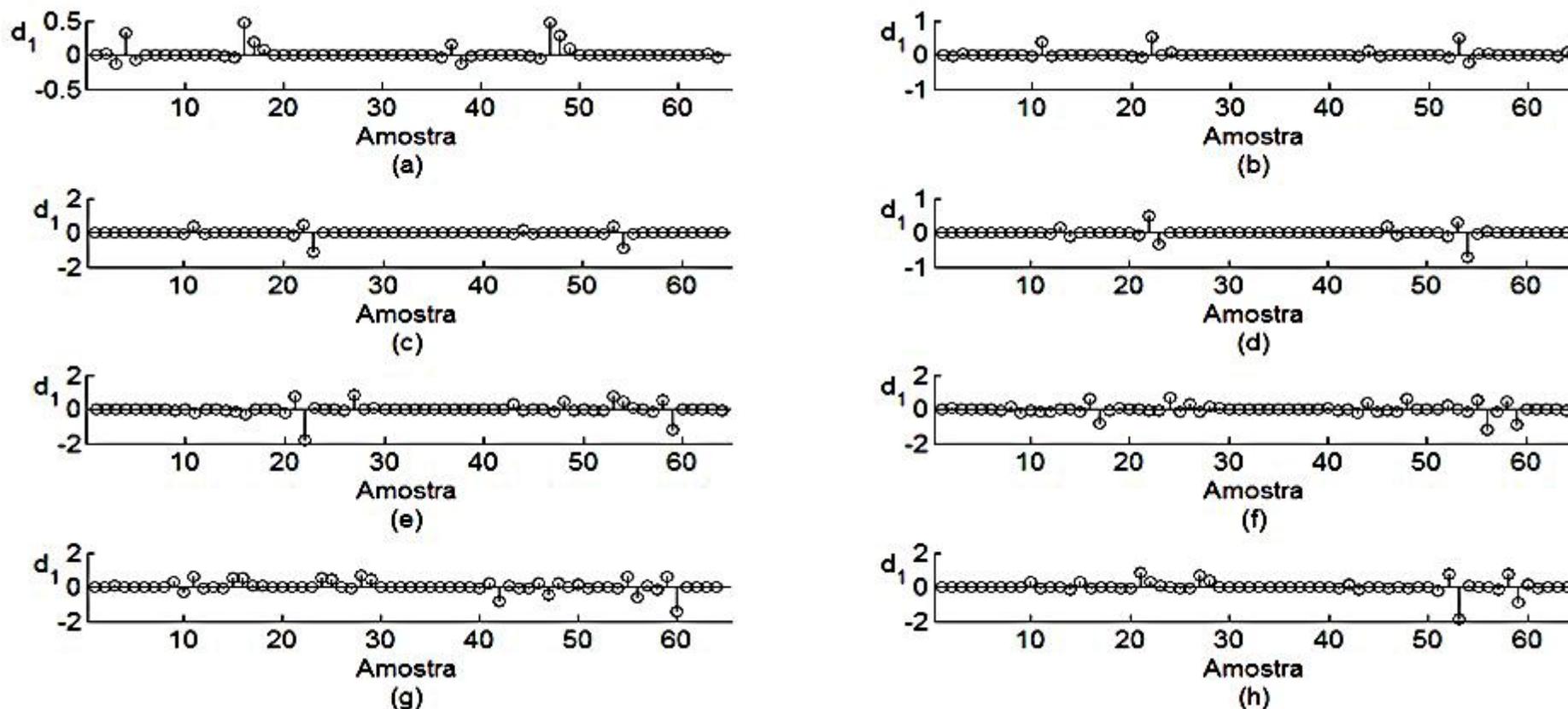


Figura I - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por entrada de um ramal com: (a) 2 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 2, instante 0,075 s (b) 2 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 1, instante 0,08 s (c) 2 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 4, instante 0,12 s, (d) 2 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 6, instante 0,36 s, (e) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 1, instante 0,36 s, (f) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 1, instante 0,20 s, (g) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 3, instante 0,22 s, (h) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 5, instante 0,31 s.

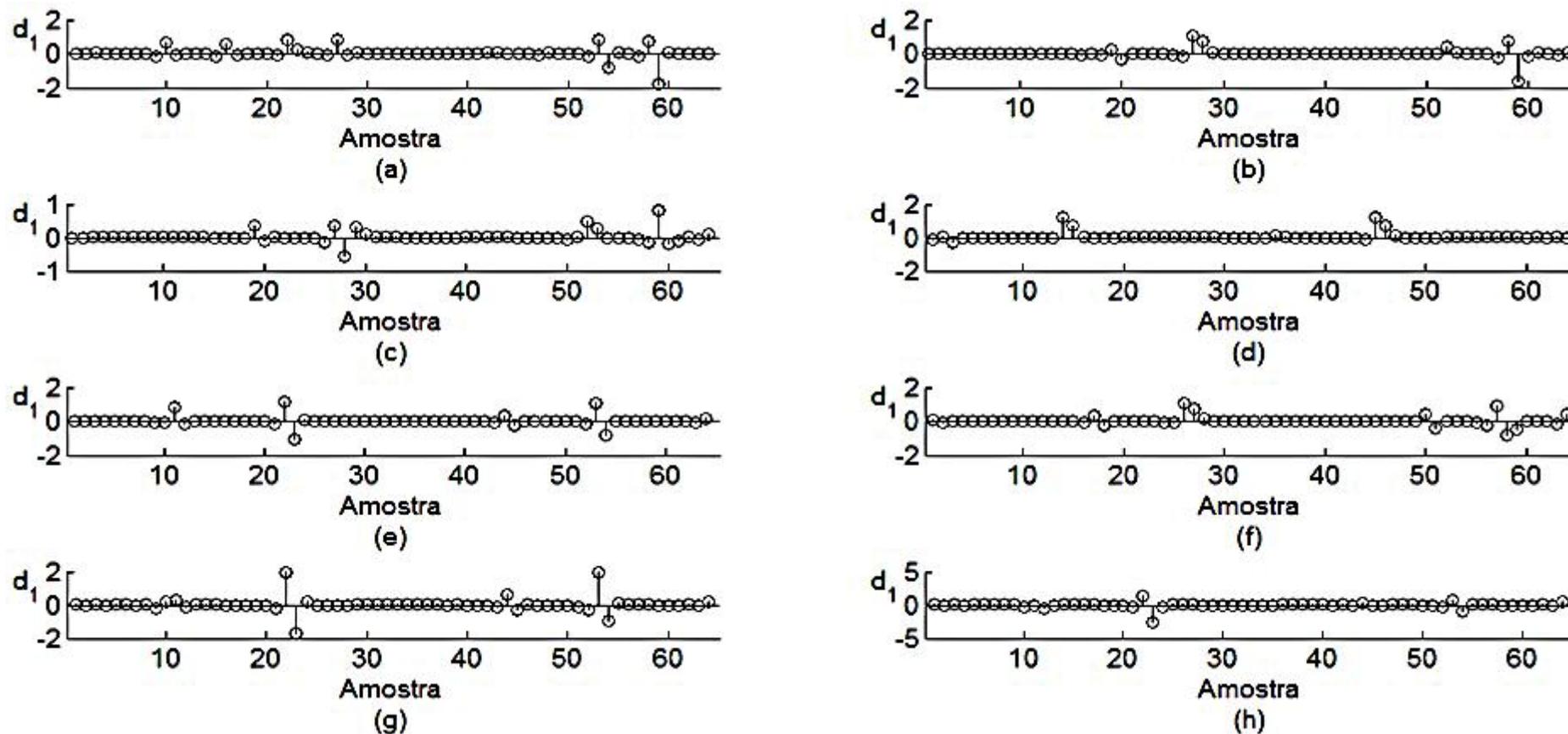


Figura J - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por entrada de um ramal com: (a) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 6, instante 0,09 s, (b) 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 1, instante 0,41 s, (c) 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 3, instante 0,36 s, (d) 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 4, instante 0,07 s, (e) 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 5, instante 0,33 s, (f) 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 6, instante 0,41 s, (g) 10 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 2, instante 0,23 s, (h) 10 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 1, instante 0,33 s.

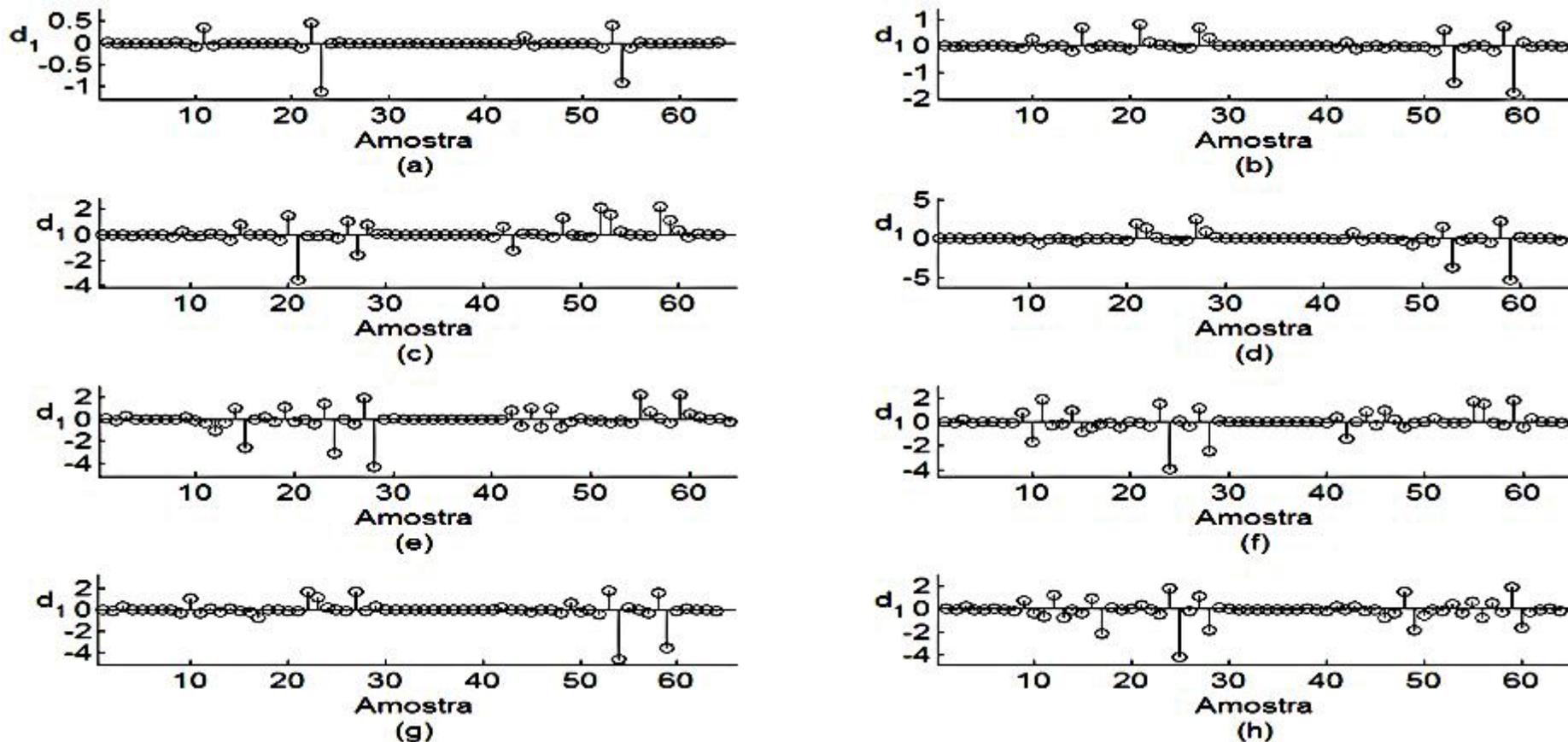


Figura K - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por entrada de um ramal com: (a) 2 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 4, instante 0,12 s, (b) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 4, instante 0,21 s, (c) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 2, instante 0,21 s, (d) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 1, instante 0,36 s, (e) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 1, instante 0,12 s, (f) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 3, instante 0,22 s, (g) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 3, instante 0,14 s, (h) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 4, instante 0,25 s.

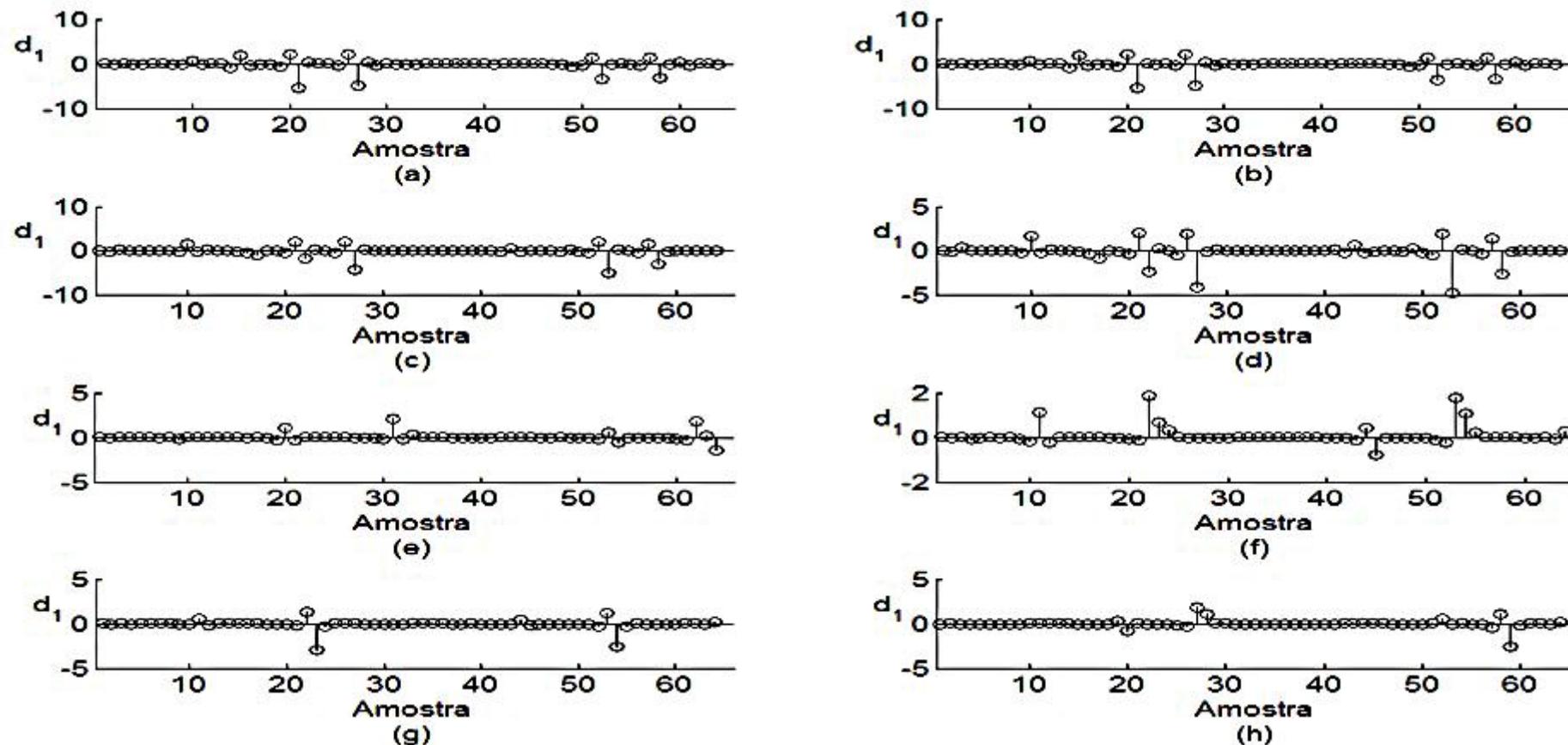


Figura L - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por entrada de um ramal com: (a) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 5, instante 0,31 s, (b) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 2, instante 0,26 s, (c) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 6, instante 0,09 s, (d) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 6, instante 0,34 s, (e) 10 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 4, instante 0,41 s, (f) 10 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 5, instante 0,33 s, (g) 10 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 3, instante 0,26 s, (h) 10 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 1, instante 0,16 s.

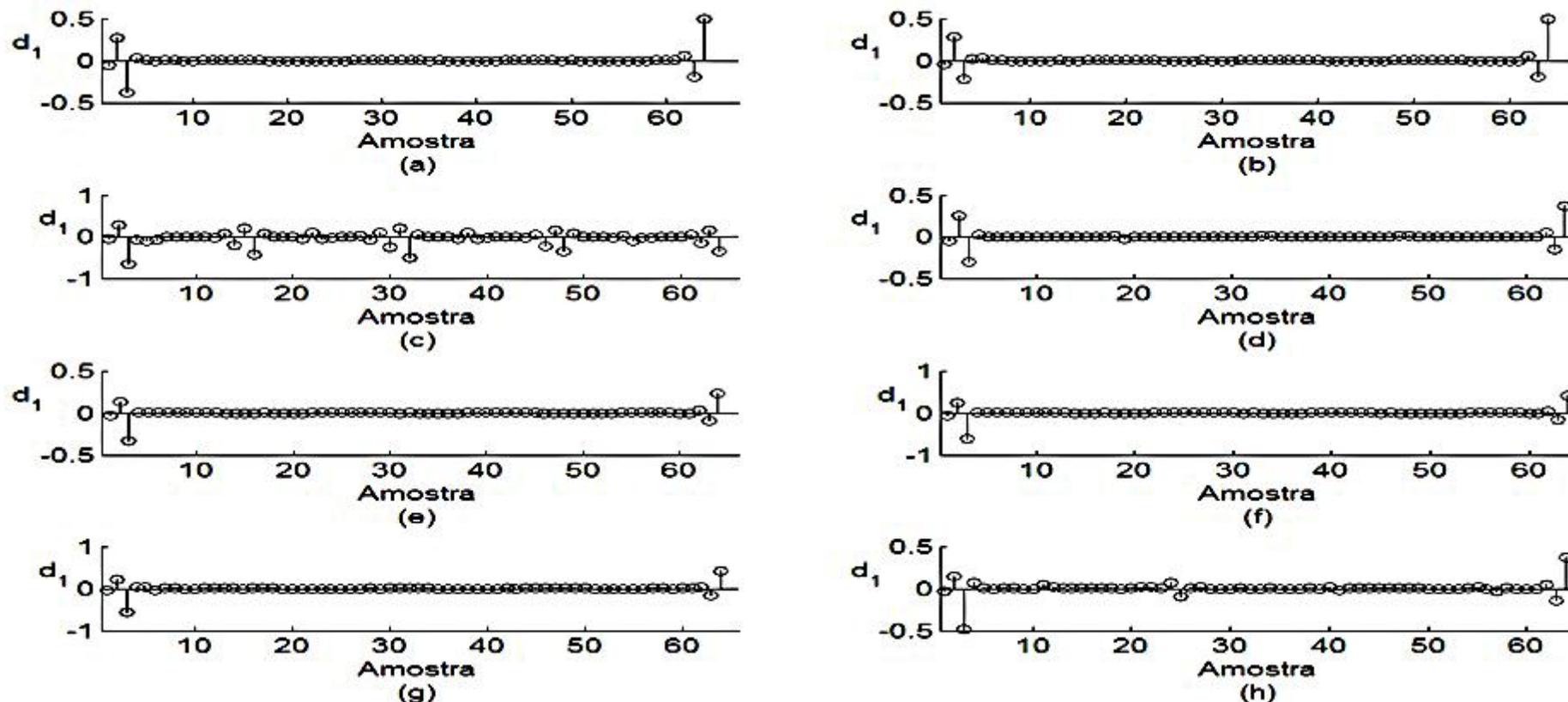


Figura M - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por saída de um ramal com: (a) 10 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 2, instante 7,37 s, (b) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 2, instante 7,3 s, abertura tripolar, (c) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 2, instante 7,67 s, abertura monopolar, (d) 10 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 1, instante 7,13 s, (e) 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 3, instante 7,51 s, (f) 10 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 3, instante 7,26 s, (g) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 3, instante 7,23 s, abertura tripolar, (h) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 3, instante 7,52 s, abertura monopolar.

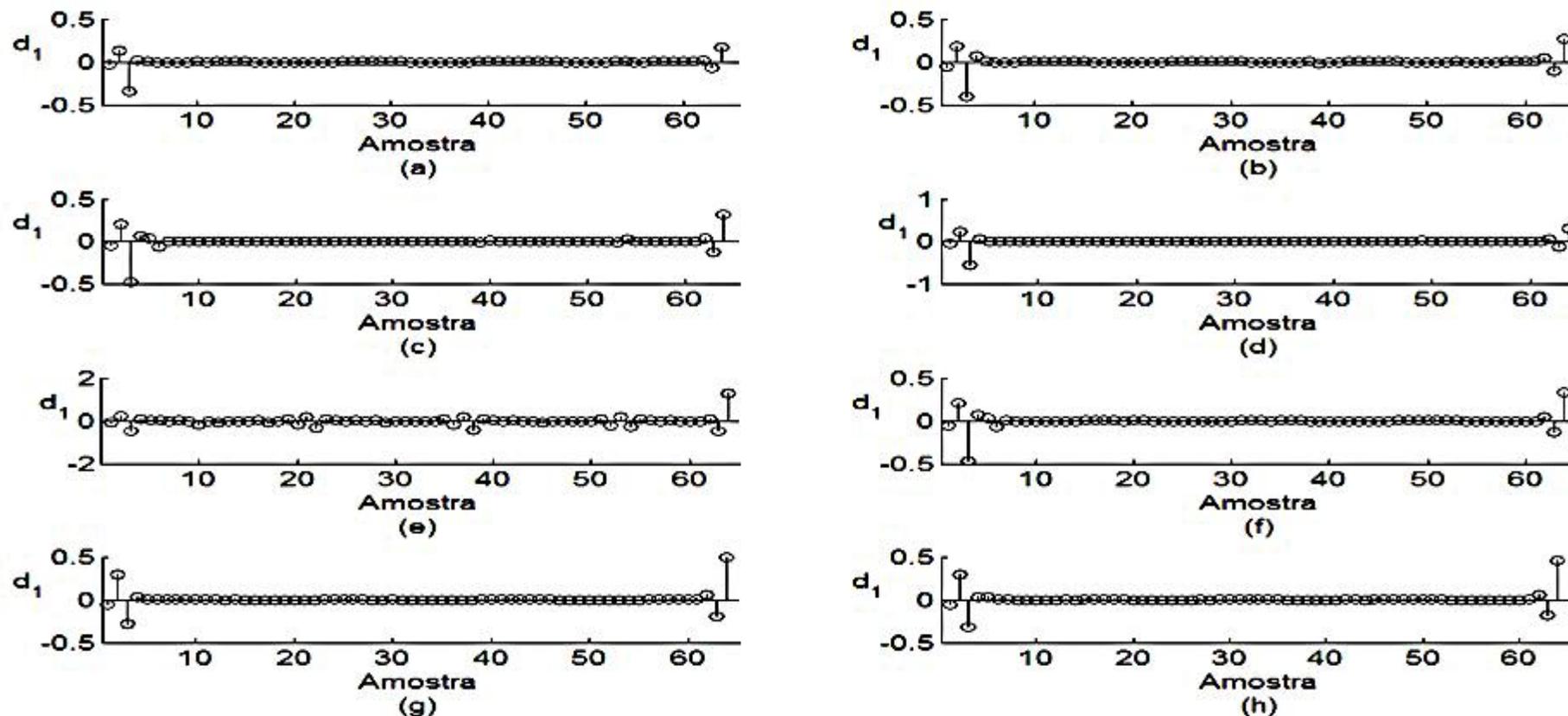


Figura N - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por saída de um ramal com: (a) 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 5, instante 7,23 s, (b) 10 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 4, instante 7,42 s, (c) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 4, instante 7,50 s, abertura tripolar, (d) 10 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 5, instante 7,31 s, (e) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 5, instante 7,10 s, abertura monopolar (f) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 5, instante 7,40 s, abertura tripolar (g) 10 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 6, instante 7,65 s, (h) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 6, instante 7,30 s, abertura tripolar.

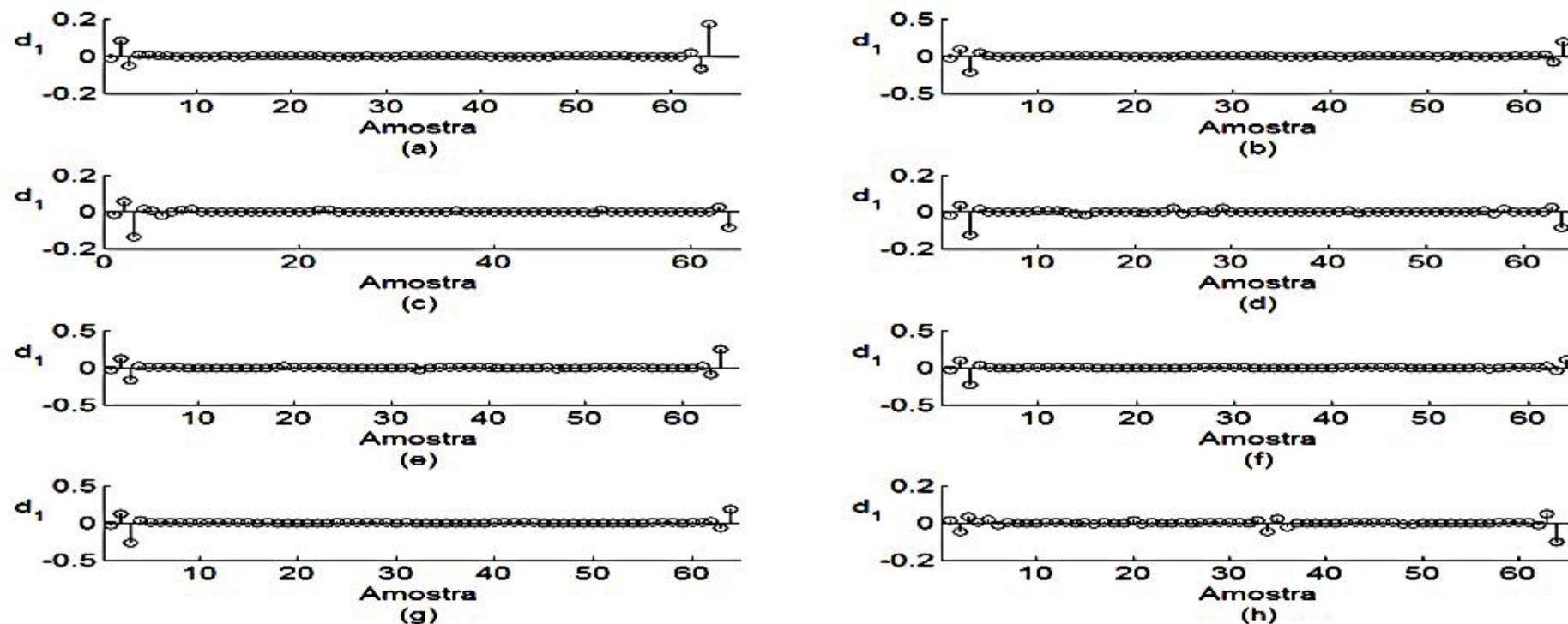


Figura O - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por saída de um ramal com: (a) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 2, instante 7,30 s, abertura tripolar, (b) 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 2, instante 7,10 s, (c) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 1, instante 7,45 s, abertura tripolar, (d) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 1, instante 7,36 s, abertura monopolar (e) 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 1, instante 7,57 s, (f) 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 4, instante 7,34 s, (g) 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 6, instante 7,20 s, abertura monopolar, (h) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 5, instante 7,50 s, abertura monopolar.

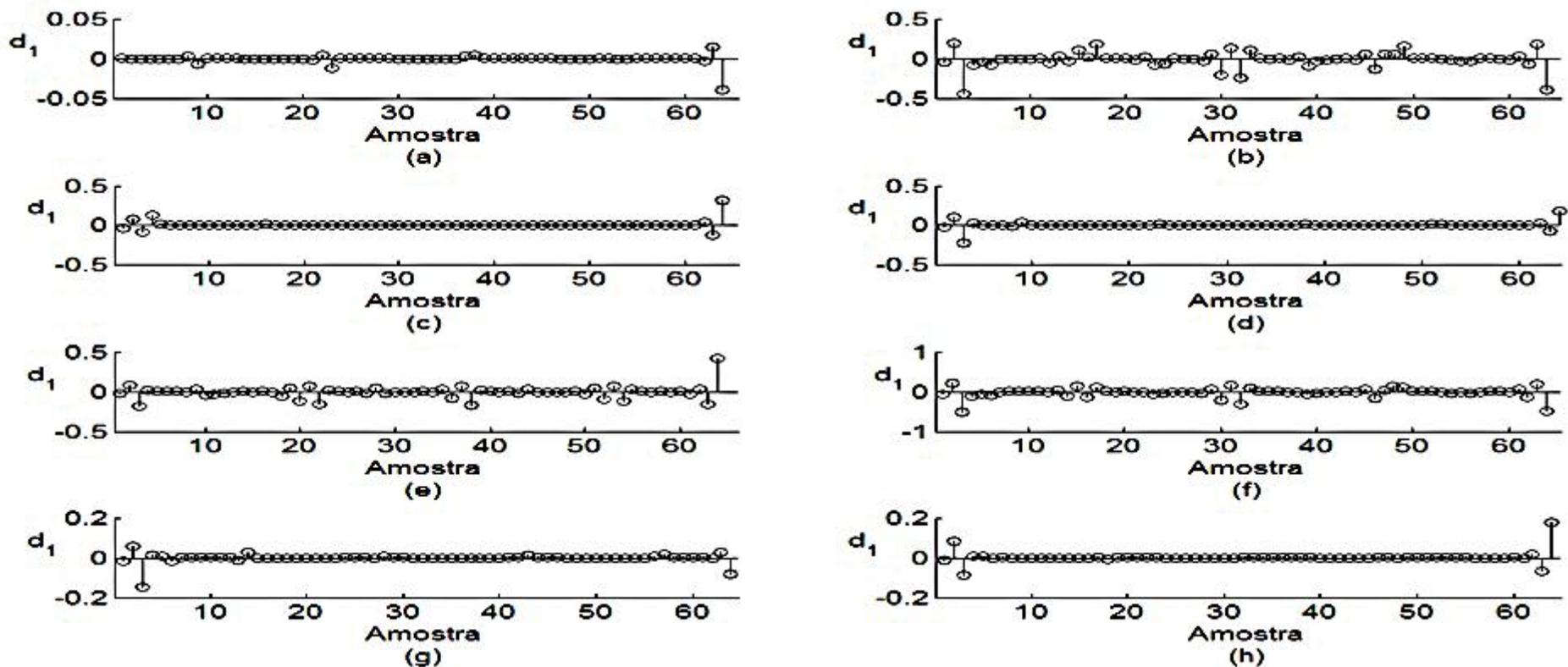


Figura P - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por saída de um ramal com: (a) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 6, instante 7,48 s, abertura tripolar (b) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 2, instante 7,43 s, abertura monopolar (c) 10 transformadores de 25 kVA trifásicos, chaveado no ponto 6, instante 7,14 s, (d) 5 transformadores de 25 kVA monofásicos, chaveado no ponto 1, instante 7,11 s, (e) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 2, instante 7,10 s, abertura monopolar (f) 10 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 6, instante 7,65 s, abertura monopolar (g) 3 transformadores de 75 kVA monofásicos, chaveado no ponto 1, instante 7,30 s, abertura tripolar, (h) 3 transformadores de 75 kVA trifásicos, chaveado no ponto 2, instante 7,78 s, abertura tripolar.

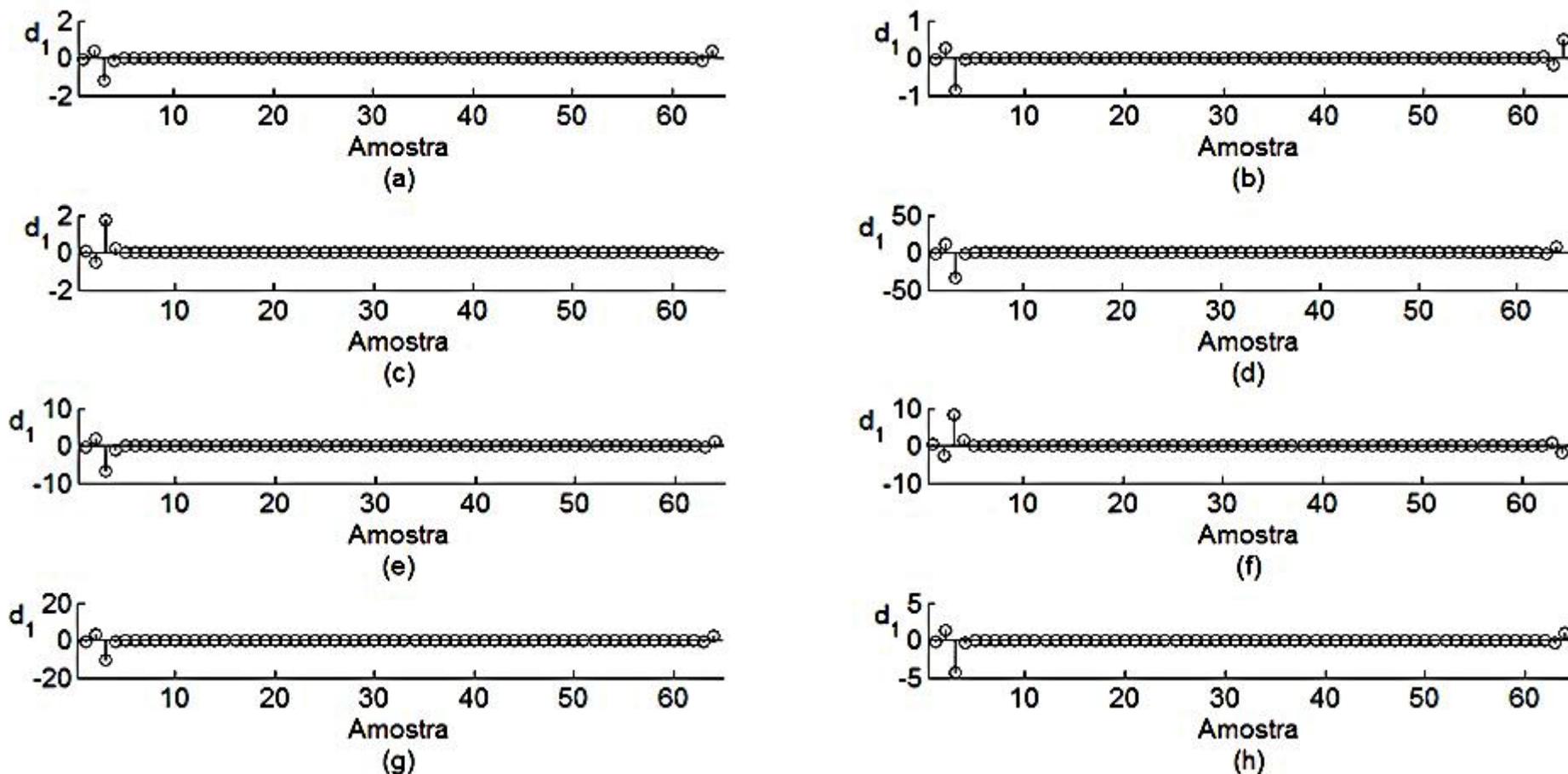


Figura Q - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por uma FAI do lado da carga com impedância de: (a) 250 Ω , chaveado no ponto 2, instante 0,3 s, (b) 250 Ω , chaveado no ponto 2, instante 0,04 s, (c) 250 Ω , chaveado no ponto 2, instante 0,23 s, (d) 250 Ω , chaveado no ponto 1, instante 0,3 s, (e) 250 Ω , chaveado no ponto 3, instante 0,3 s, (f) 250 Ω , chaveado no ponto 3, instante 0,12 s, (g) 250 Ω , chaveado no ponto 4, instante 0,3 s, (h) 250 Ω , chaveado no ponto 5, instante 0,3 s.

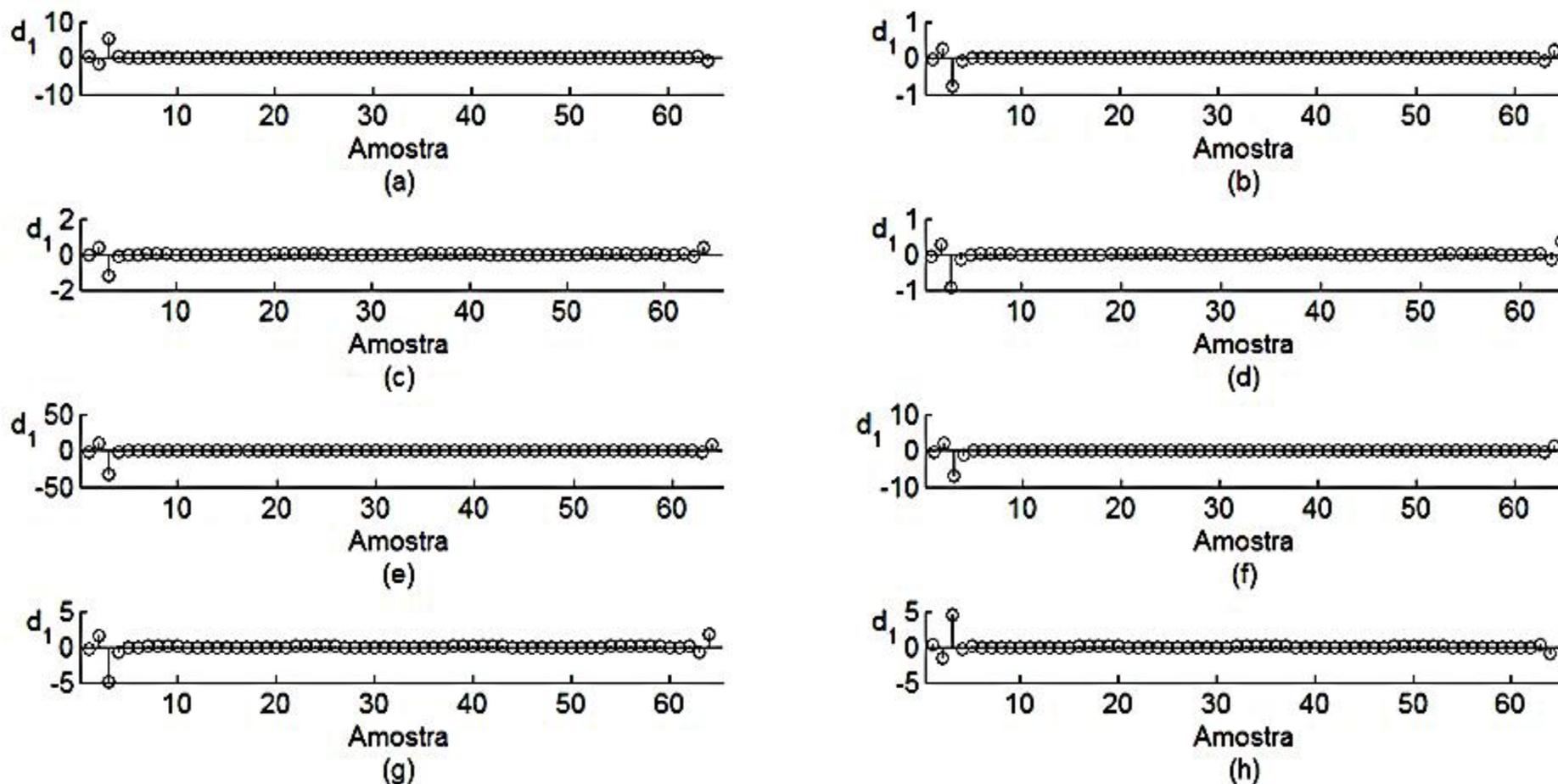


Figura R - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por uma FAI do lado da carga com impedância de: (a) 250 Ω , chaveado no ponto 5, instante 0,087 s, (b) 250 Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,30 s, (c) 300 Ω , chaveado no ponto 2, instante 0,30 s, (d) 300 Ω , chaveado no ponto 1, instante 0,83 s, (e) 300 Ω , chaveado no ponto 1, instante 0,3 s, (f) 300 Ω , chaveado no ponto 3, instante 0,3 s, (g) 300 Ω , chaveado no ponto 3, instante 0,09 s, (h) 300 Ω , chaveado no ponto 3, instante 0,21 s.

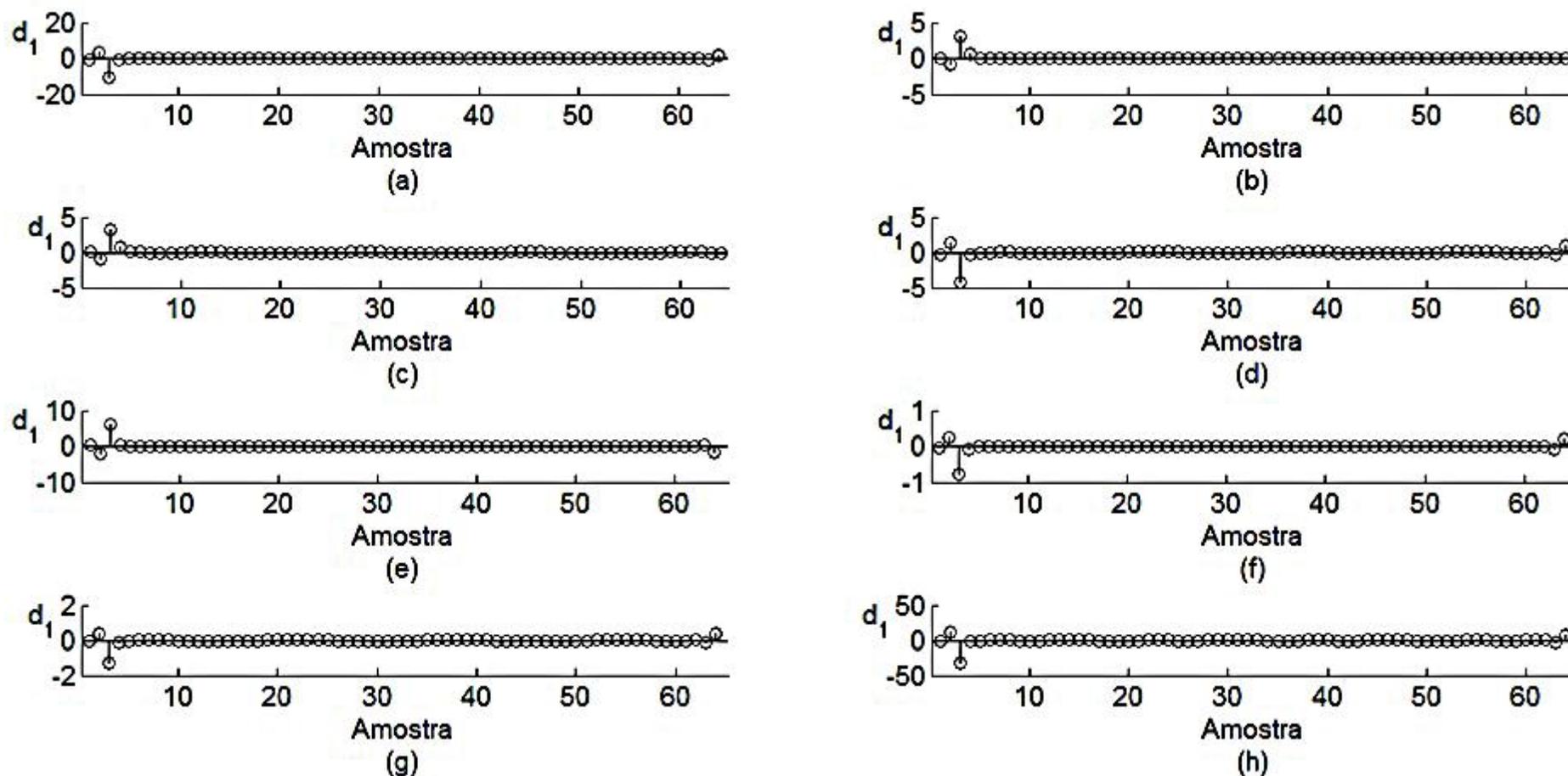


Figura S - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por uma FAI do lado da carga com impedância de: (a) 300Ω , chaveado no ponto 4, instante 0,8 s, (b) 300Ω , chaveado no ponto 4, instante 0,08 s, (c) 300Ω , chaveado no ponto 4, instante 0,23 s, (d) 300Ω , chaveado no ponto 5, instante 0,30 s, (e) 300Ω , chaveado no ponto 5, instante 0,22 s, (f) 300Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,3 s, (g) 350Ω , chaveado no ponto 2, instante 0,3 s, (h) 350Ω , chaveado no ponto 1, instante 0,3 s.

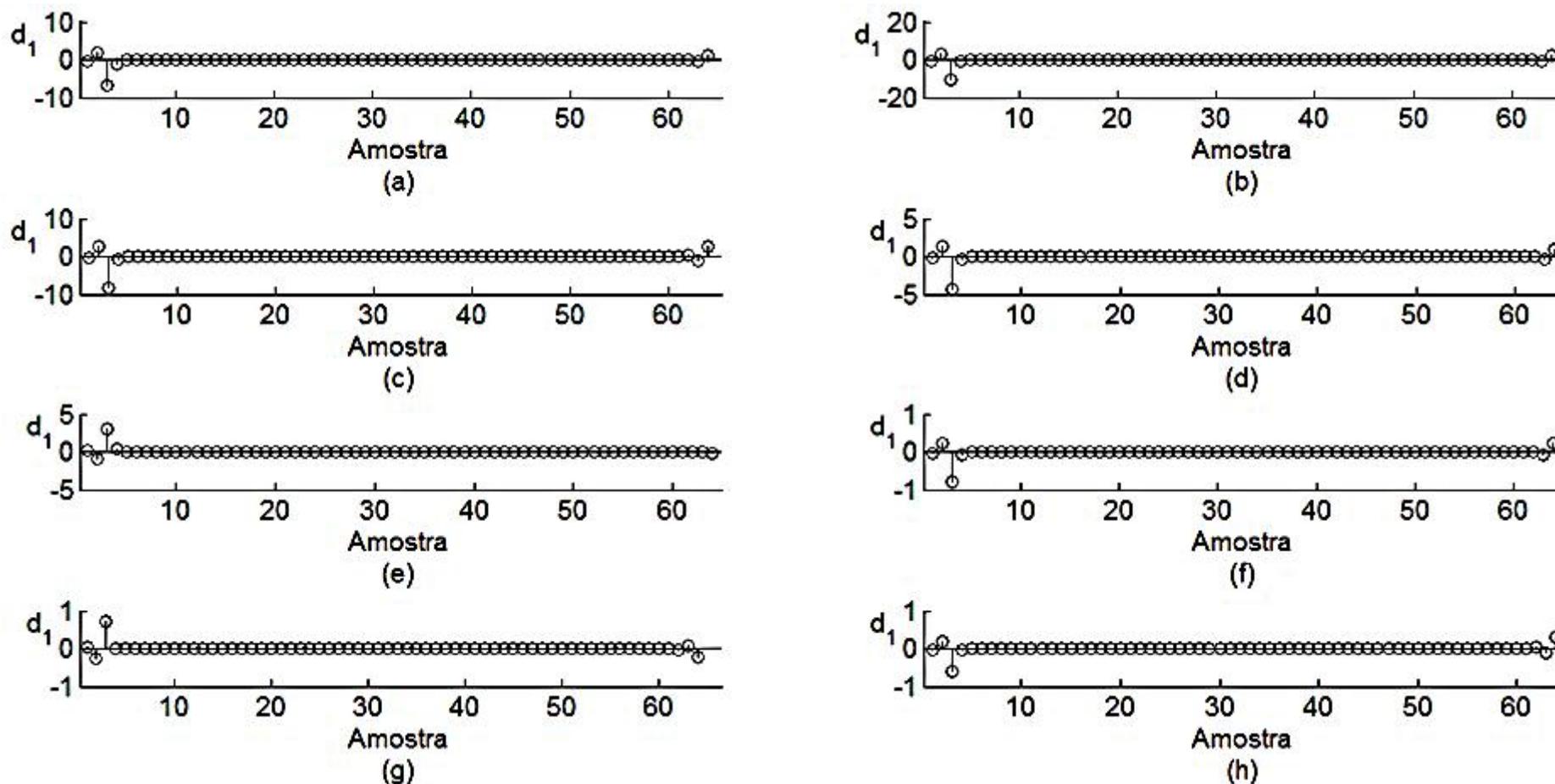


Figura T - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por uma FAI do lado da carga com impedância de: (a) 350Ω , chaveado no ponto 3, instante 0,3 s, (b) 350Ω , chaveado no ponto 4, instante 0,3 s, (c) 350Ω , chaveado no ponto 4, instante 0,14 s, (d) 350Ω , chaveado no ponto 5, instante 0,30 s, (e) 350Ω , chaveado no ponto 5, instante 0,13 s, (f) 350Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,3 s, (g) 350Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,085 s, (h) 350Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,24 s.

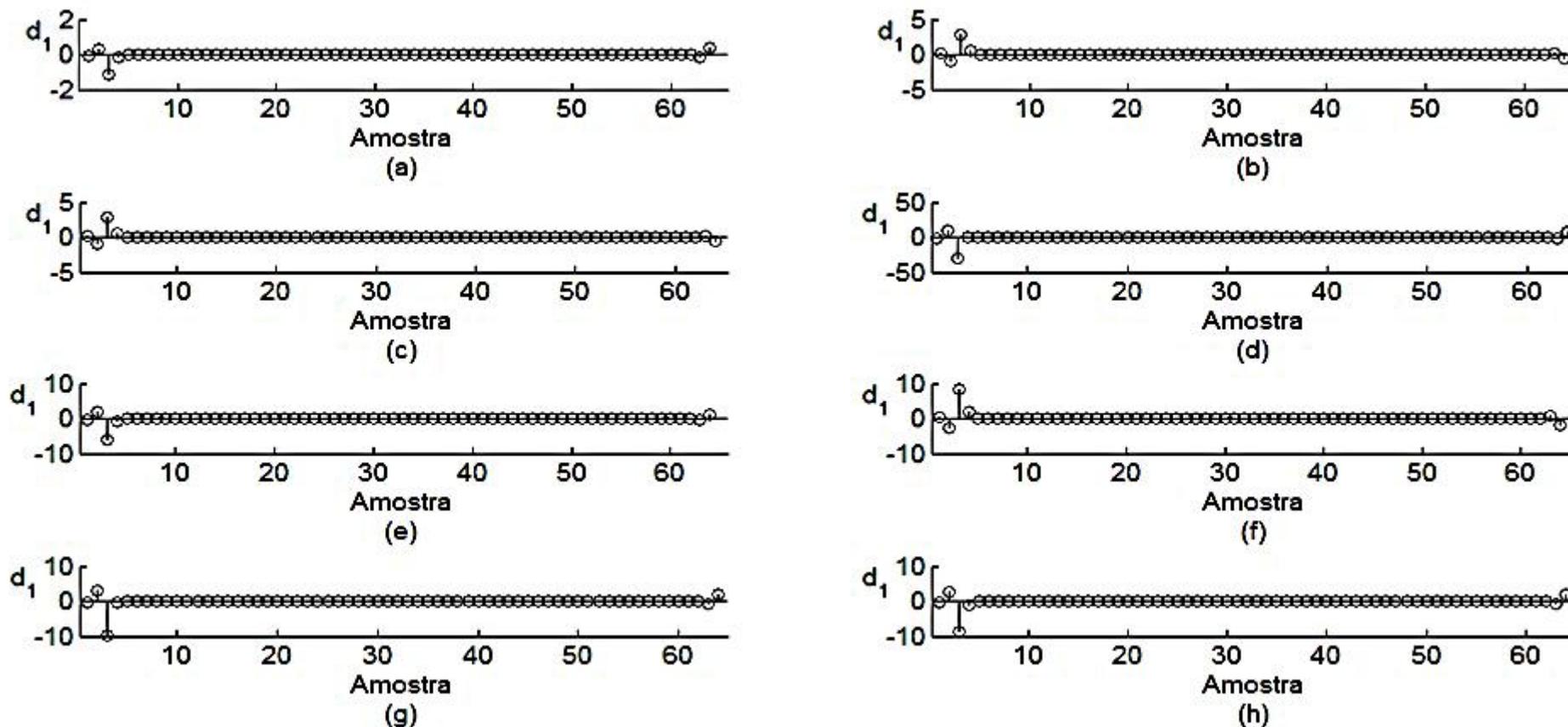


Figura U - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por uma FAI do lado da fonte com impedância de: (a) 250Ω , chaveado no ponto 2, instante 0,3 s, (b) 250Ω , chaveado no ponto 2, instante 0,07 s, (c) 250Ω , chaveado no ponto 2, instante 0,22 s, (d) 250Ω , chaveado no ponto 1, instante 0,30 s, (e) 250Ω , chaveado no ponto 3, instante 0,3 s, (f) 250Ω , chaveado no ponto 3, instante 0,22 s, (g) 250Ω , chaveado no ponto 4, instante 0,3 s, (h) 250Ω , chaveado no ponto 4, instante 0,13 s.

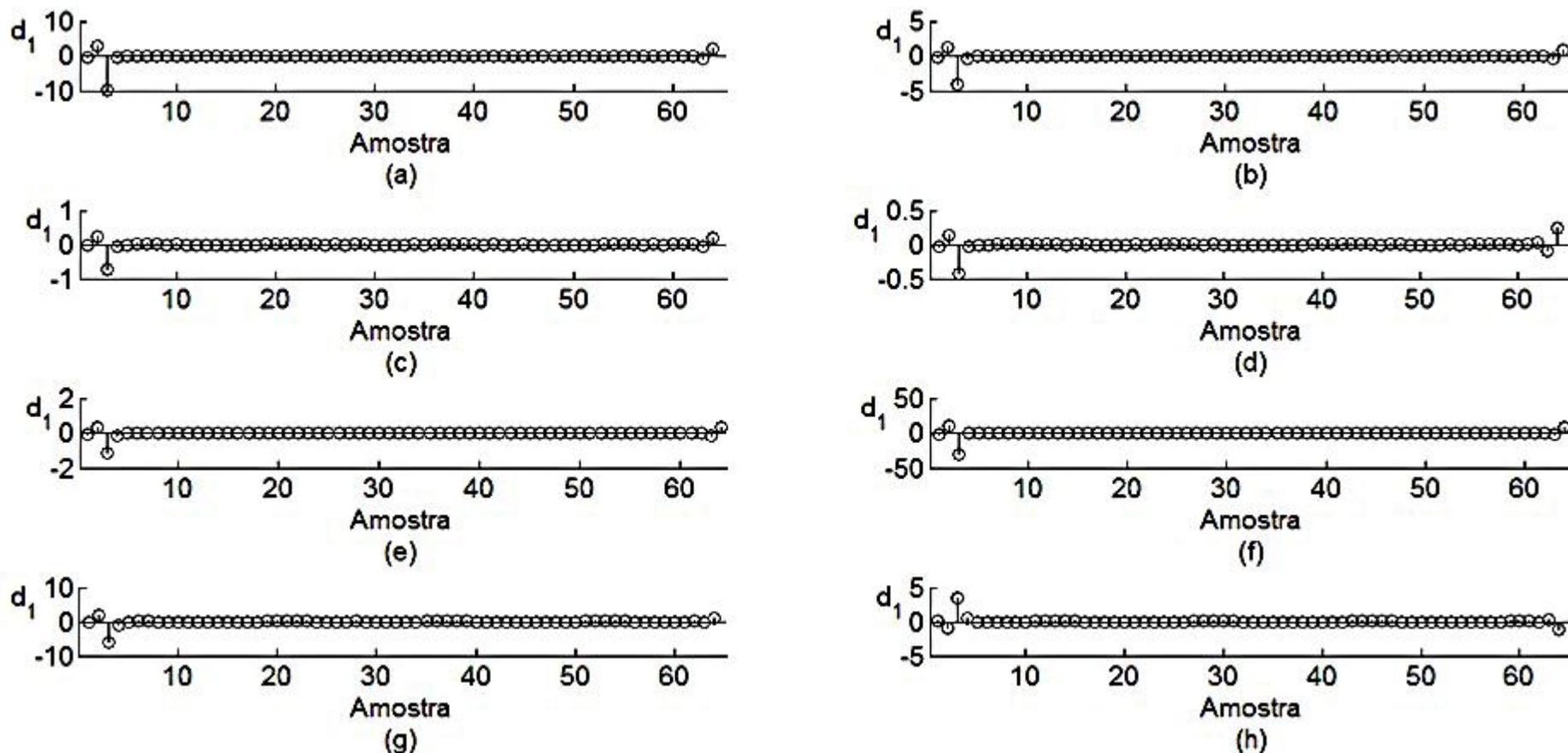


Figura V - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por uma FAI do lado da fonte com impedância de: (a) 250 Ω , chaveado no ponto 4, instante 0,15 s, (b) 250 Ω , chaveado no ponto 5, instante 0,30 s, (c) 250 Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,3 s, (d) 250 Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,14 s, (e) 300 Ω , chaveado no ponto 2, instante 0,3 s, (f) 300 Ω , chaveado no ponto 1, instante 0,3 s, (g) 300 Ω , chaveado no ponto 3, instante 0,3 s, (h) 300 Ω , chaveado no ponto 3, instante 0,13 s.

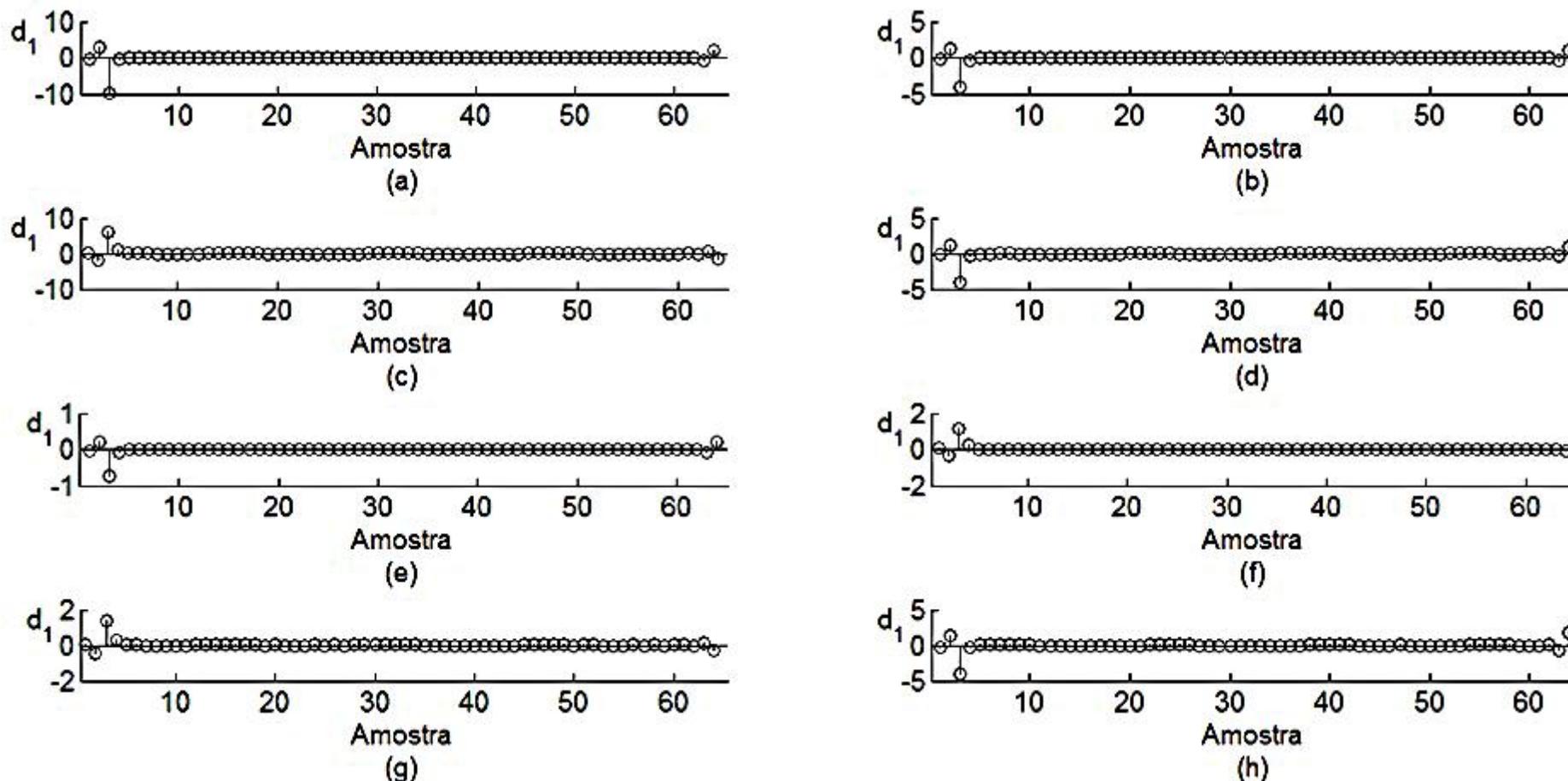


Figura X - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por uma FAI do lado da fonte com impedância de: (a) 300Ω , chaveado no ponto 4, instante 0,3 s, (b) 300Ω , chaveado no ponto 5, instante 0,30 s, (c) 300Ω , chaveado no ponto 5, instante 0,07 s, (d) 300Ω , chaveado no ponto 5, instante 0,15 s, (e) 300Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,3 s, (f) 300Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,13 s, (g) 300Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,22 s, (h) 350Ω , chaveado no ponto 3, instante 0,24 s.

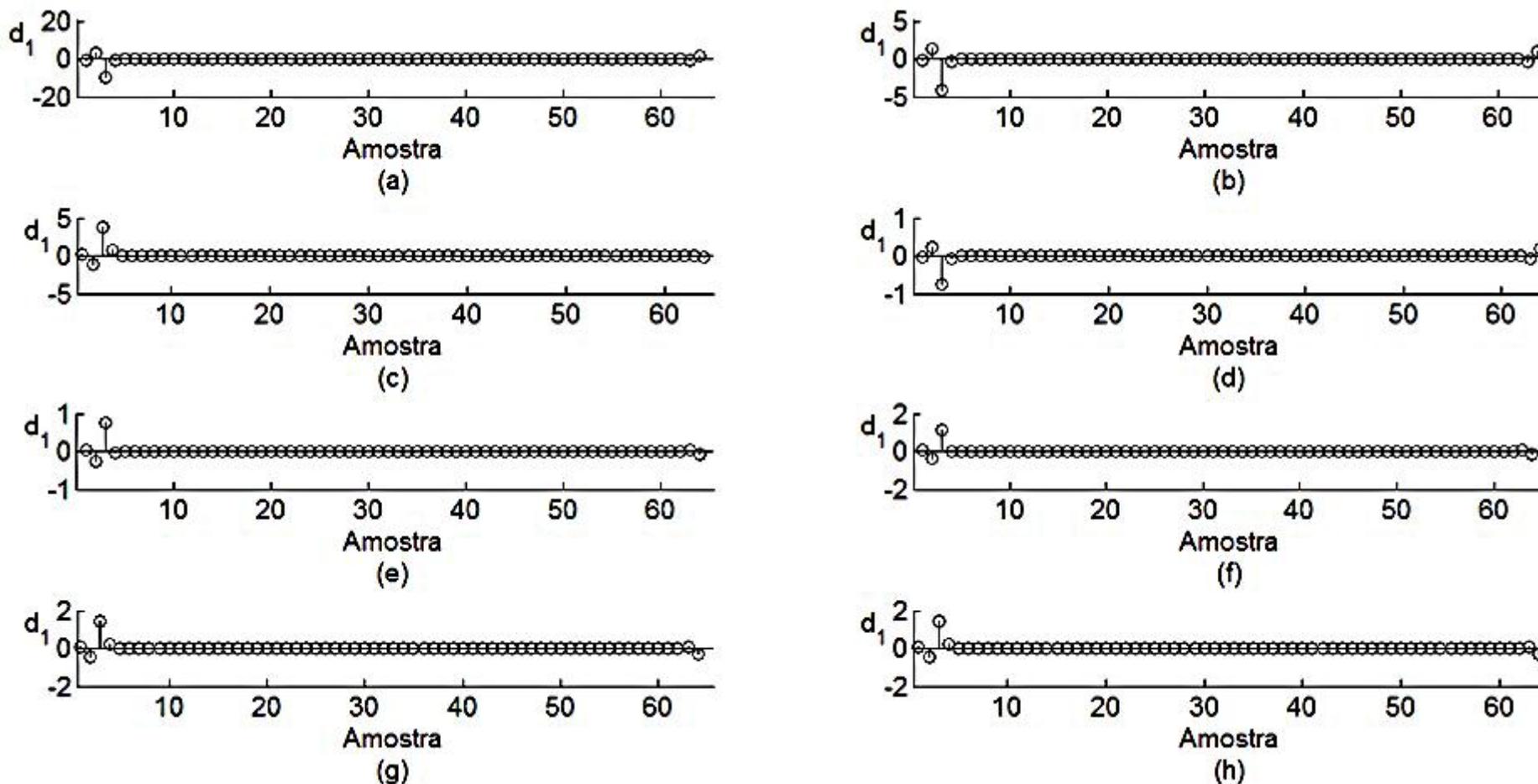


Figura Y - Coeficientes de detalhe do primeiro nível da janela composta pelas 128 primeiras amostras após início de um transitório causado por uma FAI do lado da fonte com impedância de: (a) 350 Ω , chaveado no ponto 4, instante 0,3 s, (b) 350 Ω , chaveado no ponto 5, instante 0,30 s, (c) 350 Ω , chaveado no ponto 5, instante 0,08 s, (d) 350 Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,3 s, (e) 350 Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,16 s, (f) 350 Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,13 s, (g) 350 Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,27 s, (h) 350 Ω , chaveado no ponto 6, instante 0,37 s.