



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Proposta de Algoritmos Inteligentes para Localizar Faltas e Monitorar a Qualidade da Energia em Redes de Distribuição de Energia Elétrica”

ANDRÉ DO AMARAL PENTEADO BÍSCARO

Engenheiro eletricista

Ilha Solteira - SP
abril/2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Proposta de Algoritmos Inteligentes para Localizar
Faltas e Monitorar a Qualidade da Energia em Redes de
Distribuição de Energia Elétrica”**

ANDRÉ DO AMARAL PENTEADO BÍSCARO

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia – UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Elétrica.
Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira - SP
abril/2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B621p Biscaro, Andre do Amaral Penteado.
Proposta de algoritmos inteligentes para localizar faltas e monitorar a qualidade da energia em redes de distribuição de energia elétrica / Andre do Amaral Penteado Biscaro. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2013
155 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2013

Orientador: Jose Roberto Sanches Mantovani
Inclui bibliografia

1. Curtos-circuitos - localização. 2. Energia elétrica - distribuição. 3. Redes neurais artificiais.




CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Proposta de Algoritmos Inteligentes para Localizar Falhas e Monitorar a Qualidade da Energia em Redes de Distribuição de Energia Elétrica

AUTOR: ANDRÉ DO AMARAL PENTEADO BÍSCARO


ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ROGÉRIO ANDRADE FLAUZING
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Universidade de São Paulo


Prof. Dr. EDGAR MANUEL CARREÑO FRANCO
Centro de Engenharias e Ciências Exatas - CECE / Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Data da realização: 25 de abril de 2013.

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse essa gota.

(Madre Teresa de Calcutá)

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelas oportunidades e graças concedidas na vida, por conceder-me forças, serenidade e disposição para concluir mais esta etapa de vida.

A minha família pelo incentivo, dedicação integral, compreensão, amor incondicional e por acreditarem em mim.

Ao professor Jose Roberto Sanches Mantovani pela confiança em mim creditada, pela competência e constante incentivo e dedicação em suas sábias orientações durante o transcorrer desta pesquisa.

Ao professor Mladen Kezunovic, que me recebeu com muito carinho e atenção durante minha estadia na Texas A&M e aos amigos e companheiros que por lá deixei, mas que estarão sempre perto, em meu coração.

Em especial a minha amada esposa Karina Andreia Arcos pelo amor, companheirismo, afeto, dedicação e incentivo em todos os momentos.

A todos os amigos e colegas do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LAPSEE e em especial ao amigo Rodrigo Aparecido Fernandes Pereira, que muito contribuiu para a conclusão deste trabalho.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e da seção de pós-graduação da FEIS/UNESP que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro através das bolsas de doutorado no país (Programa de Demanda Social – DS) e de doutorado sanduiche no exterior (processo nº 4831/10-1).

Resumo

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para a localização e diagnóstico automático de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica através do uso combinado de técnicas de análise de redes, processamento de sinais e sistemas inteligentes. Foram desenvolvidos algoritmos capazes de detectar, classificar e localizar no tempo e espaço, os eventos de qualidade de energia. O procedimento contínuo de detecção de distúrbios é realizado através de análises estatísticas diretas e multinível dos sinais de correntes no domínio *wavelet*, registrados na subestação.

As principais características, ou índices comportamentais, dos sinais das correntes e tensões são extraídas empregando-se a transformada *wavelet* discreta, a análise multirresolução e o conceito de energia do sinal. Estes índices correspondem aos vetores de entrada de um conjunto de redes neurais ARTMAP *Fuzzy* independentes, que tem por finalidade estimar o tipo de falta e quais eventos de qualidade de energia estão presentes no sinal amostrado. Os padrões de entrada destas redes são compostos pela energia dos coeficientes dos quatro primeiros níveis de detalhes e aproximações dos sinais de tensão e corrente e, na saída dessas redes, como resposta, tem-se o código do tipo de distúrbio e as fases envolvidas no problema.

A localização do distúrbio é realizada após o processo de classificação, sendo que a técnica de localização de faltas proposta aplica-se a alimentadores trifásicos radiais ou fracamente malhados, com cargas desequilibradas, ramais laterais trifásicos, bifásicos ou monofásicos e que possam apresentar geração distribuída.

O sistema de diagnóstico e localização de faltas proposto neste trabalho é capaz de auxiliar as concessionárias de energia em sua rotina de trabalho, fornecendo informações importantes para a operação e manutenção dos sistemas elétricos de distribuição de energia, minimizando os tempos de reparos e, conseqüentemente, obtendo-se menos perdas financeiras devido ao rápido diagnóstico de falhas e restabelecimento das condições normais de operação.

Um sistema de distribuição trifásico real de 134 barras, tensão nominal de 13,8 kV e potência nominal de 7,065 MVA foi utilizado para testar os algoritmos propostos, os quais apresentaram resultados satisfatórios, mostrando serem algoritmos eficientes, rápidos e, sobretudo, inteligentes.

Palavras-chaves: Sistemas elétricos de distribuição. Curtos-circuitos. Localização de faltas. Redes neurais artificiais.

Abstract

This work presents a methodology for automatic diagnosis and fault location on electric power distribution systems through the combined use of modern techniques of network analysis, signal processing and, intelligent systems. Some algorithms were developed aiming to detect, classify and locate in time and space the power quality disturbances. The continuous process of detecting these disturbances is accomplished through statistical analysis and direct current multilevel signal analysis in wavelet domain, recorded in the substation.

The main characteristics, or behavioral indices, of the current and voltage signals are extracted employing the discrete wavelet transform, multiresolution analysis and the concept of signal energy. These indexes correspond to the input vectors of a number of independent Fuzzy ARTMAP neural networks, which aim to estimate the fault type and the power quality events that are present in the sampled signal. The input patterns of these networks are composed by energy coefficients of the first four levels of details and approximations of current and voltage signals and, the output network presents the disorder type code and the phases involved in the problem.

The fault location is performed after the classification process, and the proposed technique applies to three-phase radial or weakly meshed feeders with unbalanced loads, lateral extensions triphasic, biphasic or, monophasic and presenting distributed generation.

The system diagnosis and fault location proposed in this paper are able to assist the utilities in their daily works, providing important information for the operation and maintenance of power distribution systems, minimizing the repairing time and, consequently, obtaining less financial losses due to rapid fault diagnosis and restoration of the normal system operation.

A real life three-phase distribution system with 134 nodes, 13.8 kV and 7.065 MVA was used to test the proposed algorithms, which showed satisfactory results, attesting that the proposed algorithms are efficient, fast and, above all, intelligent.

Keywords: Distribution systems. Short-circuit. Fault location. Artificial neural networks.

Lista de Figuras

	Pg.
Figura 1 – Fluxograma do sistema localizador de faltas e análise da qualidade da energia.	22
Figura 2 - Divisão das técnicas de localização de faltas.	23
Figura 3 - Exemplo de um sistema elétrico de potência típico.	29
Figura 4 - Linha de transmissão.	30
Figura 5 - Subestação de distribuição com religadores e fusíveis.....	31
Figura 6 – Circuito equivalente para a máquina síncrona.	36
Figura 7 - Sistema de transmissão de energia simples.	38
Figura 8 - Injeções de potência em uma barra k do sistema.....	39
Figura 9 - Esquema de renumeração de barras da rede de distribuição IEEE 34 barras.	42
Figura 10 - Representação de uma linha l trifásica com cargas conectadas.....	43
Figura 11 – Fluxograma do algoritmo de fluxo de carga.	48
Figura 12 – Fluxograma do algoritmo de cálculo de curto-circuito.	50
Figura 13 – Problemas na magnitude de tensão segundo a Norma IEEE Std.1159.	54
Figura 14 – Ganho computacional com o uso da FFT.	59
Figura 15 – Decomposição da DFT em duas subsequências.	60
Figura 16 – Decomposição subsequente das DFTs.....	60
Figura 17 – Estrutura tipo borboleta.	61
Figura 18 – Borboleta da estrutura do algoritmo FFT-DIF.....	61
Figura 19 – Estrutura do algoritmo FFT-DIF.....	61
Figura 20 – Janela de Hanning	63
Figura 21 - Wavelet mãe tipo chapéu mexicano.	64
Figura 22 - Escalamento aplicado à wavelet mãe tipo chapéu mexicano.	67
Figura 23 - Translação aplicada à wavelet mãe tipo chapéu mexicano, para t=0.	68
Figura 24 - Processo de filtragem de um sinal.	69
Figura 25 - Processo de diminuição do número de amostras (downsampling).	69

Figura 26 - Exemplo de filtragem com downsamplig de um sinal ruidoso.....	70
Figura 27 - Processo de decomposição de um sinal em AMR.	70
Figura 28 - Áreas de aplicação da TW em SEP.	71
Figura 29 – Estrutura topológica de uma rede ART-Fuzzy.	75
Figura 30 – Fluxo de informações da rede ARTMAP-Fuzzy.	76
Figura 31 – Fluxograma do algoritmo de detecção de distúrbios.	83
Figura 32 - Esquema de janelamento do sinal de entrada para detecção de distúrbios.....	84
Figura 33 - Exemplo de detecção de um distúrbio.....	86
Figura 34 - Decomposição em AMR de um distúrbio de afundamento de tensão.....	86
Figura 35 – Fluxograma do algoritmo de classificação de distúrbios.....	90
Figura 36 - Diagrama de blocos do algoritmo de localização de faltas.....	96
Figura 37 – Diagrama de blocos completo do algoritmo para o cálculo da FFT.	97
Figura 38 - Modelo de um sistema simples sob falta.	102
Figura 39 – Cálculo da distância de um ponto à uma reta.	103
Figura 40 – Cálculo da distância entre o ponto em falta e as linhas candidatas.....	104
Figura 41 – Sistema de distribuição trifásico real de 134 barras, 13,8 kV e 7,065 MVA.....	107
Figura 42 – 18ª janela da decomposição em AMR para a detecção do distúrbio de corrente.....	109
Figura 43 - Exemplo de estimação da amplitude de um afundamento de tensão.....	111
Figura 44 - Sistema de distribuição trifásico com a presença de geração distribuída.	117
Figura 45 - Magnitudes das tensões e correntes na SE para uma falta ocorrida na barra 70, fase A. ...	118
Figura 46 - Falta na fase A da barra 70 e provável região em falta.	119
Figura 47 - Classificação das barras para uma falta fase A na barra 70.....	120
Figura 48 - Número de barras localizadas por posição de classificação para faltas fase A - terra.....	120
Figura 49 - Número de barras localizadas por probabilidade de ocorrência de falta.	121
Figura 50 - Falta bifásica entre as fases A e B da barra 110 e provável região em falta.....	121
Figura 51 - Classificação das barras para uma falta bifásica entre as fases A e B na barra 110.	122
Figura 52 - Número de barras localizadas por posição de classificação para faltas bifásicas.....	122
Figura 53 - Número de barras localizadas por probabilidade de ocorrência de falta.	123

Figura 54 - Classificação das barras para uma falta trifásica na barra 85.	123
Figura 55 - Falta trifásica na barra 85 e provável região em falta.....	124
Figura 56 - Número de barras localizadas por posição de classificação para faltas trifásicas.	124
Figura 57 - Número de barras localizadas por probabilidade de ocorrência de falta.	125
Figura 58 – Influência da resistência na falta fase-terra para uma falta na fase A do sistema.	127
Figura 59 – Influência da resistência na falta fase-terra em relação à posição localizada.	127
Figura 60 – Influência do modelo de carga em relação à posição localizada.	128
Figura 61 – Influência do modelo de carga para uma falta de $10,0 \Omega$ na fase C do sistema.....	129
Figura 62 – Exemplo dos níveis de carregamento aleatórios dos transformadores de distribuição.	131
Figura 63 – Influência do carregamento dos transformadores na posição das barras localizadas.	131
Figura 64 – Influência do carregamento dos transformadores na ocorrência de faltas.	132
Figura 65 – Influência da penetração de GD na posição das barras localizadas.	133
Figura 66 – Influência da penetração de GD na probabilidade de ocorrência de falta.....	134
Figura 67 – Histograma das resistências de falta fase-terra e entre fases.	136
Figura 68 – Histograma das posições localizadas.	136
Figura 69 – Intervalos de confiança de probabilidade e de posição.....	137
Figura 70 – Influência da posição e número de medidores instalados no sistema.	138
Figura 71 - Sistema de distribuição trifásico com a presença de geração distribuída.	139

Lista de Tabelas

	Pg.
Tabela 1 - Partes comuns de um sistema elétrico de potência	29
Tabela 2 - Tipos de tecnologias de geração distribuída.	36
Tabela 3 – Tipos de barras utilizadas nos estudos de potência.	39
Tabela 4 - Parâmetros para os diferentes tipos de equipamentos nas expressões gerais de fluxo.....	40
Tabela 5 - Resumo das características dos distúrbios relacionados com a QE.	54
Tabela 6 - Categorias e características dos fenômenos de qualidade de energia elétrica.....	57
Tabela 7 - Codificação dos diferentes tipos de eventos de qualidade de energia.....	92
Tabela 8 - Codificação dos diferentes tipos de curto-circuito.....	94
Tabela 9 – Simulações realizadas para as análises de curto-circuito.	108
Tabela 10 – Detecção de um distúrbio de corrente na fase A.	109
Tabela 11 - Equações paramétricas para os distúrbios de qualidade de energia.	110
Tabela 12 – Conjuntos de treinamentos e testes realizados para os eventos de QE na Fase A.....	111
Tabela 13 – Eficiência operacional das RNAs treinadas para eventos de QE na Fase A.	112
Tabela 14 – Eficiência operacional das RNAs treinadas para eventos de QE na Fase B.....	112
Tabela 15 – Eficiência operacional das RNAs treinadas para eventos de QE na Fase C.....	113
Tabela 16 – Conjuntos de treinamentos e testes realizados para os eventos de QE na fase C.....	113
Tabela 17 – Treinamento continuado da RNA treinada com os dados do medidor 115, na fase C	114
Tabela 18 – Variáveis utilizadas nas simulações dos curtos-circuitos.....	115
Tabela 19 – Eficiência das RNAs treinadas para a classificação de curtos-circuitos.....	116
Tabela 20 – Eficiência das RNAs treinadas com os índices característicos de corrente.....	116
Tabela 21 – Influência da resistência de falta no processo de classificação das barras.	126
Tabela 22 – Nível de carregamento dos transformadores de distribuição.....	130
Tabela 23 – Influência da penetração da geração distribuída no processo de localização de faltas.....	133
Tabela 24 – Variáveis estocásticas consideradas nas simulações.	135
Tabela 25 – Valores médios dos resultado das simulações estocásticas.	135

Lista de Abreviaturas e Siglas

AMR	Análise multirresolução.
ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
GD	Geração distribuída.
GDs	Geradores distribuídos.
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers.
PRODIST	Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional.
QE	Qualidade de energia.
QEE	Qualidade da energia elétrica.
RNA	Rede neural artificial.
RNAs	Redes neurais artificiais.
SDEE	Sistemas de distribuição de energia elétrica.
SE	Subestação.
SEP	Sistema elétrico de potência
SIN	Sistema interligado nacional.
TW	Transformada wavelet.
UTRs	Unidades de terminal remoto.
ZIP	Impedância constante, corrente constante e potência constante.

Lista de Símbolos

P_0	Potência ativa inicial
Q_0	Potência reativa inicial
V_0	Tensão inicial.
V_{esp}	Tensão especificada
Z_{esp}	Impedância especificada
I_{esp}	Corrente especificada
S_{esp}	Potência aparente especificada
S_i^{nom}	Potência nominal do i -ésimo transformador;
S_{SE}	Potência aparente estimada para a subestação;
$\cos(\varphi_{SE})$	Fator de potência estimado para a subestação;
nt	Número total de transformadores instalados no alimentador;
ρ_i	Carregamento médio do transformador i . $0 \leq \rho_i \leq 1$
V_k	Magnitude do fasor tensão nodal da barra k ;
θ_k	Ângulo de fase do fasor tensão nodal da barra k ;
P_k	Injeção líquida (geração – carga) de potência ativa na barra k ;
Q_k	Injeção líquida (geração – carga) de potência reativa na barra k .
\hat{I}_{km}	Fasor da corrente que sai da barra k em direção à barra m ;
P_{km}	Fluxo de potência ativa que sai da barra k em direção à barra m ;
Q_{km}	Fluxo de potência reativa que sai da barra k em direção à barra m ;
I_{ia}, I_{ib}, I_{ic}	Injeções de corrente no nó i correspondente às cargas polinomiais e elementos shunts;
S_{ia}, S_{ib}, S_{ic}	Cargas conectadas ao nó i ;
V_{ia}, V_{ib}, V_{ic}	Tensões no nó i ;
Y_{ia}, Y_{ib}, Y_{ic}	Admitâncias de todos os elementos shunts conectados ao nó i ;
α, β, γ	Percentuais das cargas ZIP.
x, y	Variáveis de entrada e saída, respectivamente;
A, B	Termos linguísticos associados aos conjuntos nebulosos.
J_{la}, J_{lb}, J_{lc}	Correntes fluindo na seção de linha l ;
I_{ja}, I_{jb}, I_{jc}	Injeções de correntes das cargas conectadas ao nó j ;
J_{ma}, J_{mb}, J_{mc}	Correntes fluindo na seção de linha m ;

M	Conjunto de seções de linha conectadas ao nó j .
S_{k+1}^{SE}	Nova potência aparente estimada para a subestação;
S_k^{SE}	Potência aparente estimada para a subestação na iteração k ;
S_{med}^{SE}	Potência aparente medida na subestação;
V_k^{calc}	Tensão calculada no passo v ;
I_k^{calc}	Corrente calculada no passo v .
I_{SE}	Corrente medida no nó inicial do alimentador;
I_i	Corrente de carga no transformador i ;

SUMÁRIO

	Pg.
1	Introdução 18
1.1	Definição do Problema 19
1.2	Objetivos e Contribuições da Tese 21
1.3	Revisão Bibliográfica 22
1.4	Organização do Texto..... 27
2	Técnicas de Análises de Redes e Distúrbios em SDEE..... 28
2.1	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - SDEE..... 28
2.2	Modelos de Cargas: geração e consumo;..... 32
2.2.1	Cargas de Potência Constante;..... 33
2.2.2	Cargas de Impedância Constante 33
2.2.3	Cargas de Corrente Constante 34
2.2.4	Cargas Polinomiais (mistas) 35
2.2.5	Geração Distribuída: modelos e análises. 35
2.3	Fluxo de Carga para Redes de Distribuição 37
2.3.1	Fluxo de Carga para Redes Trifásicas 41
2.4	Análises de Curto-Circuito 49
2.5	Distúrbios de Qualidade de Energia 53
3	Técnicas de Análises de Sinais e Redes Neurais Artificiais 58
3.1	Transformada de Fourier 58
3.2	Transformada Wavelet..... 64
3.2.1	Transformada Wavelet Contínua 66
3.2.2	Transformada Wavelet Discreta 66
3.2.3	Escalamento 67

3.2.4	Translação.....	68
3.2.5	Análise Multirresolução.....	68
3.2.6	Aplicações da TW em Sistemas Elétricos de Potência.....	71
3.3	Redes Neurais Artificiais	72
3.3.1	Rede Neural ARTMAP-Fuzzy	74
4	Metodologia Proposta.....	82
4.1	Algoritmos de Detecção e Classificação de Distúrbios.....	82
4.1.1	Módulo 1: Detecção do Distúrbio e Localização no Tempo	84
4.1.2	Módulo 2: Extração das Características do Sistema.....	88
4.1.3	Módulo 3: Análise da Qualidade de Energia.....	92
4.1.4	Módulo 4: Análise de Curto-Circuito	93
4.2	Algoritmo de Localização de Falta	95
4.2.1	Aquisição e Processamento Digital dos Sinais.....	97
4.2.2	Estimativa da Potência Pré-falta na Saída do Alimentador.....	99
4.2.3	Estimativa das Potências Pré-falta dos Transformadores de Distribuição	100
4.2.4	Estimativa da Corrente de Falta.....	101
4.2.5	Cálculo dos Desvios de Tensão	102
4.2.6	Identificação da Seção em Falta	105
5	Testes e Resultados.....	107
5.1	Algoritmo de Detecção e Classificação de Distúrbios	107
5.1.1	Detecção dos Distúrbios e Localização no Tempo.....	108
5.1.2	Análise da Qualidade de Energia.....	110
5.1.3	Análises de Curto-Circuito	115
5.2	Algoritmo de Localização de Falta	117
5.2.1	Aquisição e Processamento de Sinais.....	118

5.2.2	Localização das Falhas	119
5.2.3	Influência das Resistências de Falta Fase-terra	126
5.2.4	Influência do Modelo de Carga	128
5.2.5	Influência do Carregamento dos Transformadores de Distribuição	130
5.2.6	Influência da Geração Distribuída	133
5.2.7	Simulando um Sistema Real.....	134
5.2.8	Influência da Posição e do Número de Medidores Instalados.....	138
6	Conclusões.....	140
6.1	Trabalhos Futuros	142
	REFERÊNCIAS	144
	Apêndice A – Dados do Alimentador.....	152

1 Introdução

O rápido crescimento econômico e tecnológico vivenciado atualmente exige cada vez mais demanda por energia e uma maior eficiência energética do setor elétrico brasileiro. Esse crescimento acelerado tem gerado boas oportunidades para a pesquisa e o desenvolvimento de novos produtos e serviços que atendam a realidade das empresas e consumidores. Atualmente, a energia é vista como um produto e não mais como um serviço e, assim como todo produto, passa a ser quantificada através de suas características, tais como, qualidade, preço e acessibilidade. Nas sociedades modernas as cargas/consumidores são muito mais sensíveis aos eventos de qualidade de energia, ou seja, às variações e quedas de tensão.

Entende-se por evento de qualidade de energia qualquer falha ou desvio das condições desejadas de funcionamento do sistema elétrico em regime permanente e, de maneira geral, esses eventos se manifestam como deformidades nas formas de onda, tanto das tensões quanto das correntes. Considerando as formas de onda das tensões, podem-se encontrar vários tipos de eventos tais como: *notches*, distorções harmônicas, afundamentos de tensão (*sag*), sobretensão (*swell*), *flickers*, impulsos (*spikes*), transitórios oscilatórios, dentre outros. A presença desses fenômenos indesejáveis no sistema elétrico pode causar vários tipos de problemas como o mau funcionamento de equipamentos eletrônicos e sistemas de proteção, interferência em sistemas de comunicação e uma variedade de outros tipos de problemas. Estes eventos podem ter duração menor que 0,5 ciclos, em transitórios impulsivos, ou até vários minutos, em afundamentos de tensão sustentados. A norma IEEE Std. - 1159 (2009) estabelece as práticas recomendadas para o monitoramento da qualidade da energia elétrica, apresentando uma descrição consistente dos fenômenos eletromagnéticos normalmente observados nos sistemas elétricos de potência (SEP).

Portanto, tornam-se cada vez mais importante e necessário o controle e análise da qualidade da energia fornecida aos clientes por parte das concessionárias de energia elétrica. O presente trabalho procura apresentar uma metodologia que contemple essas necessidades.

1.1 Definição do Problema

As faltas ocorridas nos sistemas de distribuição afetam a qualidade da energia em termos de continuidade de serviço e propagação de distúrbios. São responsáveis por distúrbios em processos produtivos industriais, perda de informações, perdas econômicas e avaria de equipamentos, entre outros. Atualmente, cerca de 80% das interrupções são causadas por faltas em sistemas de distribuição e a aplicação dos métodos de localização de faltas, desenvolvidos para linhas de transmissão, não podem ser diretamente empregados nos sistemas de distribuição radiais aéreos devido a diversos fatores, tais como: (a) topologia da rede e seus princípios operativos (operação radial); (b) número limitado de equipamentos de medição; (c) presença de linhas aéreas e subterrâneas; (d) carga distribuída e desbalanceada (cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas); (e) presença de ramais laterais ao longo do alimentador principal; (f) linhas heterogêneas (cabos de diferentes tipos e tamanhos) e desbalanceadas (não transpostas). Estes aspectos introduzem erros na estimação da falta, dificultando o processo de localização.

Durante as últimas décadas tem ocorrido um rápido crescimento dos sistemas de distribuição de energia elétrica, resultando em um grande aumento na dimensão do sistema elétrico nacional e no número de linhas em operação. Estas linhas estão sujeitas às falhas, que podem ser causadas por raios, tempestades, chuva, neve, quebra de isolamento, defeito de equipamentos, falha humana, vegetação, animais, dentre outros fatores. Na maioria dos casos estas falhas se manifestam através de danos mecânicos em equipamentos do sistema, que devem ser reparados antes que eles voltem a operar. Sendo assim, devido à topologia comumente radial dos alimentadores e ao grande número de equipamentos, as falhas ocorridas nos sistemas de distribuição são difíceis de rastrear. Portanto, as falhas ocorridas nos sistemas elétricos de distribuição afetam a confiabilidade do sistema, sua segurança e a qualidade da energia fornecida.

Uma localização de falta eficiente, rápida e precisa, ajuda a minimizar os tempos necessários para localizar o problema e reparar o sistema, agilizando o reestabelecimento do fornecimento de energia através da restauração da rede, além de auxiliar na redução dos custos de manutenção e operação desses sistemas. O processo de restauração do sistema pode ser realizado com maior eficiência e agilidade quando a localização da falta é conhecida ou, pelo menos, possa ser estimada com boa precisão.

Sendo assim, uma localização de falta rápida e precisa desempenha um papel importante para a qualidade da energia elétrica, pois acelera o processo de restauração, diminuindo o tempo de interrupção e, conseqüentemente, aumentando a confiabilidade operacional do sistema de distribuição.

O processo de localização de faltas consiste em determinar a localização geográfica de uma falta ocorrida no sistema, de forma automática, através do processamento digital das formas de onda de tensões e correntes medidas na subestação e ao longo da rede, através de informações de equipamentos de controle e proteção, tais como chaves seccionadoras automáticas, religadores e seccionadores equipados com unidades de terminal remoto (UTRs). A informação precisa da localização da falta, disponibilizada logo após sua ocorrência, ajuda as equipes de manutenção das concessionárias a agilizar o serviço de manutenção, restauração ou reconfiguração da rede, a fim de reduzir o tempo de interrupção e diminuir as perdas financeiras devido à energia não suprida.

A maior parte das pesquisas realizadas até hoje priorizam a localização de faltas ocorridas em linhas de transmissão. Isto se deve, principalmente, aos impactos causados por essas faltas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). O tempo necessário para checar fisicamente e reparar essas linhas é muito maior do que o tempo gasto em linhas de subtransmissão ou distribuição. Dada a importância das empresas distribuidoras atenderem seus consumidores com qualidade e confiabilidade, métodos mais eficientes para localização de falhas em sistemas de distribuição, restauração rápida do fornecimento de energia e serviços de atendimento ao cliente de boa qualidade estão se tornando cada vez mais necessários e é com base nessas premissas que esta tese foi desenvolvida.

1.2 Objetivos e Contribuições da Tese

O objetivo geral deste projeto de tese é desenvolver um sistema completo para detecção, localização e classificação de faltas e de distúrbios de qualidade de energia, comumente encontrados nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Trata-se da busca de soluções para melhorar a qualidade e precisão de algoritmos dedicados à localização de faltas em alimentadores de distribuição que possuem geração distribuída (GD) instalada e baixo nível de automação. Deve-se notar que, quando se trata de detecção, localização e também classificação de distúrbios, muitas ferramentas computacionais têm sido propostas e utilizadas isoladamente, porém, poucos trabalhos contemplam a abordagem completa de localização e análise dos distúrbios presentes nos sinais elétricos de tensão e corrente da rede.

Desta forma, a pesquisa desenvolvida neste projeto centra-se em várias questões-chaves relacionadas à qualidade de energia e localização de falhas, tais como: a disponibilidade de poucas informações para localizar falhas, identificação de sensibilidades a erros, identificação e localização de faltas permanentes e temporárias que afetam a qualidade da energia e o ganho de experiência com a utilização de dados reais de sistemas de distribuição. Sendo assim, as principais contribuições deste trabalho são:

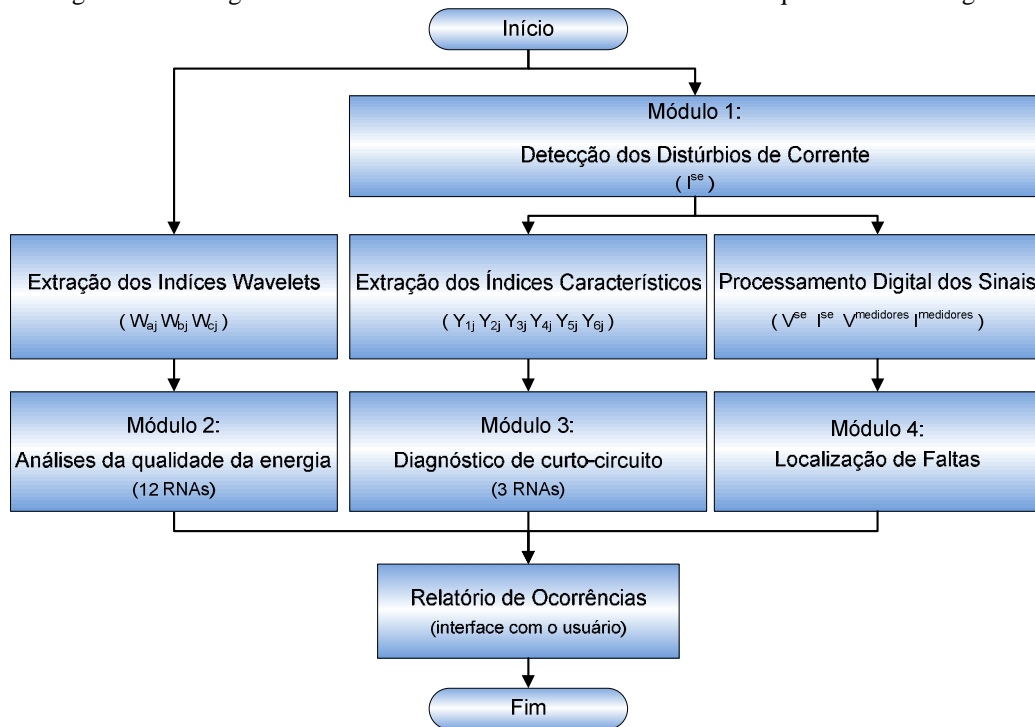
- A detecção automática de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica através de análises das oscilografias das correntes trifásicas, registrados na SE.

- O diagnóstico rápido e preciso do tipo de falta e dos eventos de qualidade de energia presentes nos sinais amostrados, através da utilização combinada dos conceitos da Transformada Wavelet (TW), Análise Multirresolução (AMR) e Rede Neural Artificial (RNA) do tipo ARTMAP-Fuzzy. A união destes conceitos, na concepção do sistema de diagnóstico, propicia maior flexibilidade, precisão e alto nível de confiabilidade aos resultados obtidos.

- A estimativa da localização geográfica da falta através de um algoritmo de localização de faltas baseado na análise de circuitos elétricos e desvios de tensão. O algoritmo de localização proposto para análise do estado operativo dos sistemas de distribuição necessita das oscilografias de corrente e de tensão provenientes do sistema de medição presente na subestação e das oscilografias das tensões medidas em alguns pontos remotos, localizados ao longo do alimentador.

Na Figura 1 apresenta-se o fluxograma do sistema localizador de faltas e análise da qualidade da energia, desenvolvido neste trabalho.

Figura 1 – Fluxograma do sistema localizador de faltas e análise da qualidade da energia.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

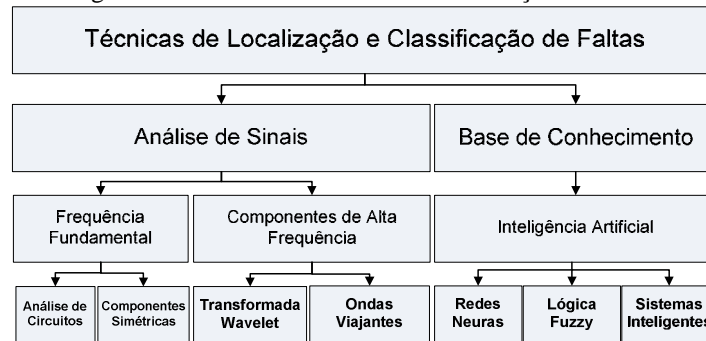
A implementação computacional foi realizada por meio de esquemas inteligentes modulares, na qual se buscou desenvolver algoritmos que pudessem ser prontamente modificados. Havendo necessidade de melhorar o desempenho do sistema, basta substituir um ou mais módulos. A metodologia proposta foi testada em um sistema de distribuição real de 134 barras, tensão nominal de 13,8 KV, com potência nominal de 7,065 MVA e os resultados obtidos são analisados e discutidos.

1.3 Revisão Bibliográfica

O método tradicional de localização de faltas utilizado pelas empresas distribuidoras é baseado nas chamadas telefônicas dos consumidores ao “*Call Center*” que, através da localização geográfica do cliente e da conectividade da rede, precisam estimar a localização das ocorrências e despachar as equipes de manutenção, a fim de que estas possam identificar o defeito na rede através de uma inspeção visual. Este processo pode levar muito tempo, dependendo das condições climáticas e geográficas do local. Também ocorrem, certas vezes, de não haver nenhuma chamada durante a madrugada, quando as pessoas se encontram dormindo, o que aumenta o problema do operador para estimar a localização da falta.

Willis (1991) apresenta um resumo das técnicas clássicas utilizadas durante anos na solução do problema de localização de faltas. A Figura 2 apresenta uma divisão geral das técnicas de localização e classificação de faltas encontradas na literatura.

Figura 2 - Divisão das técnicas de localização de faltas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Lehtonen, Pettisallo e Etula (1991) discutem as bases teóricas e a implementação de um método de localização de faltas para sistemas de distribuição radiais através de análises fasoriais. Os parâmetros que afetam a precisão da localização da falta também são discutidos, tais como, os efeitos das correntes de carga e da resistência de falta, as variações das impedâncias de rede e a precisão dos equipamentos de medição. As medições são realizadas a uma frequência de amostragem de 500 Hz e os fasores de frequência fundamental são extraídos através da aplicação da Transformada Discreta de Fourier (EMBREE, 1999).

Girgis, Fallon e Lubkeman (1993) propõem uma técnica de localização de faltas para alimentadores rurais de distribuição usando valores de tensão e corrente medidos em um único terminal. Para levar em consideração o efeito das correntes de carga e os desbalanços do sistema, utilizam um modelo de impedância constante para as cargas e um fluxo de potência trifásico similar ao fluxo tipo varredura - backward-forward sweep (CHENG; SHIRMOHAMMADI, 1995) - para determinar o estado do sistema (valores das tensões e correntes). A distância da falta até a SE é calculada através de um método baseado no conceito de impedância aparente e no uso dos fasores de frequência fundamental das tensões e correntes atualizadas.

Novosel, Hart e Myllyaki (1998) baseiam seu método na ideia de localização de faltas em linhas de transmissão curtas, derivada da metodologia proposta por Girgis, Fallon e Lubkeman (1993). O método leva em consideração a impedância da fonte (Z_g), a impedância total das linhas (Z_L) e a impedância equivalente das cargas (Z_C), porém, não leva em consideração o desbalanceamento de cargas. Este método mostra-se atrativo por sua simplicidade.

Saha, Provoost e Rosolowski (2001) apresentam um método que utiliza os valores das tensões e correntes da frequência fundamental, medidas em um terminal, antes e durante a falta. A distância da falta até a SE é estimada considerando-se os aspectos construtivos das redes. Este método realiza a localização da falta em dois passos. Primeiro, a impedância da malha de falta é calculada utilizando-se as tensões e correntes medidas antes da falta. Em seguida, as impedâncias de falta ao longo do alimentador são calculadas assumindo faltas em cada seção sucessiva. A indicação do local da falta é obtida através da comparação da impedância medida e da impedância calculada. Em 2002, Saha e Rosolowski (2002c) patenteiam esse método e também outro (2002b), muito parecido, no qual utilizam os valores das impedâncias equivalentes de sequência zero e positiva, calculadas para cada nó e, baseando-se no conhecimento da configuração e topologia do alimentador, calculam o local e o tipo de falta ocorrido.

Suárez, Carrillo-Caicedo e Vargas-Torre (2010a e 2010b) apresentam uma revisão das técnicas que utilizam componentes simétricas e análise direta de circuitos elétricos para localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE). O princípio básico destas técnicas é a derivação de expressões matemáticas que dependem da resistência de falta e da distância da falta em relação ao ponto de medição. Uma vez que essas expressões são encontradas, resolvem-se as equações baseadas nas medidas elétricas registradas no ponto de medição, geralmente a SE.

Kezunovic (2004) apresenta algumas vantagens de se utilizar técnicas inteligentes para análise de distúrbios em sistemas de energia elétrica, tais como o ganho de experiência, conhecimento sobre o assunto e a redução do tempo de análises através da automação do processo. O procedimento para detecção e classificação de faltas é abordado empregando-se os conceitos de Redes Neurais Artificiais (RNAs) e Lógica Fuzzy (LF). O uso das RNAs possibilita um diagnóstico correto dos distúrbios, mesmo depois de alterações nas condições de operação do sistema, e a Lógica Fuzzy ajuda a melhorar o desempenho destas redes neurais quando os dados estão incompletos ou são imprecisos.

Diaz e López (2005) apresentam o estado da arte das técnicas de localização de faltas para sistemas de distribuição, desenvolvidas entre os anos 1990-2005, analisando e classificando 109 referências em duas áreas distintas: análise de sinais e baseada em conhecimento. Saha et al. (2002a) apresentam uma revisão das técnicas propostas por (DAS, 1998; NOVOSEL et al., 1998; SAHA et al., 2001, 2002b).

Zhang e Kezunovic (2005) desenvolvem um software para análise de faltas por meio da interação entre o Matlab e o ATP na qual milhares de simulações de falta e operação normal do sistema são utilizados para treinar uma rede neural ART. A detecção e a classificação da anormalidade são realizadas empregando-se um algoritmo fuzzy *K-Nearest neighbor*. Por último, para localizar geograficamente o defeito, é usado o método dos mínimos quadrados, para linhas curtas, ou o método das ondas viajantes, para linhas longas.

Das (2006) desenvolve um algoritmo baseado nos conceitos de lógica fuzzy para diagnosticar faltas em sistemas radiais de distribuição de energia elétrica com cargas desbalanceadas. A metodologia apresentada é capaz de identificar as fases envolvidas na falta, levando-se em consideração dez tipos de curtos-circuitos. Este método necessita apenas das oscilografias de corrente registradas na SE.

Decanini (2007) apresenta uma metodologia que utiliza os sinais das correntes trifásicas, medidas na saída do alimentador que, através de um sistema de inferência fuzzy, identifica o tipo de falta e as respectivas fases envolvidas no problema.

Pereira (2007) apresenta uma metodologia eficiente e de baixo esforço computacional para localização de faltas do tipo fase-terra em alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica. Esta técnica é composta por equações de rede baseadas nos métodos de fluxo de potência do tipo varredura considerando que haja disponibilidade de medições de tensões no nó inicial do alimentador e também medições esparsas de tensões em alguns pontos ao longo do alimentador de distribuição.

Mora-Florez, Meléndez e Carrillo-Caicedo (2008) comparam e avaliam 10 diferentes métodos de localização de faltas que utilizam informações de tensão e corrente, medidas em um único terminal, na SE. Os sinais da componente fundamental das tensões e correntes pré-falta e durante a falta são utilizados para estimar a resistência de falta vistas do ponto de medição. Os desvios entre os sinais pré-falta e durante a falta, juntamente com os parâmetros do sistema de distribuição, são utilizados para calcular a distância até a falta. Todos os métodos avaliados se baseiam no mesmo conceito (impedância aparente), cujos principais problemas são: a alta dependência do modelo (configuração e parâmetros das linhas) e a múltipla estimação do local da falta, devido à presença de ramais laterais.

Pereira et al. (2009a, 2009b e 2009c) ampliam a técnica desenvolvida em 2007, verificando a robustez da metodologia proposta através de vários testes, nos quais foram consideradas as influências das variações dos modelos de carga e de linhas, do carregamento dos transformadores e das resistências e tipos de falta.

Biscaro (2009) apresenta um sistema de localização de faltas híbrido, no qual utiliza um sistema de inferência fuzzy para identificar e classificar as faltas e, em seguida, aplica um método baseado em afundamentos de tensão e análise de circuitos elétricos para identificar o local da falta. Neste trabalho é apresentado também um novo modelo matemático para realizar a alocação otimizada dos medidores de tensão ao longo do alimentador.

Decanini et al. (2011a e 2011b) utilizam a Transformada Wavelet para a extração das características das oscilografias de tensão e corrente medidas na SE. Estas características são agregadas via conceito de entropia e utilizadas como entrada de uma rede neural ARTMAP-Fuzzy, responsável por classificar os distúrbios de tensão.

Tonelli Neto et al. (2011a e 2011b) seguem a mesma linha de pesquisa anterior, aplicando as teorias de RNAs e lógica fuzzy para a detecção e classificação de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica.

Kezunovic (2011) apresenta uma discussão sobre as questões relacionadas à melhoria da precisão dos métodos de diagnóstico de faltas em uma rede inteligente utilizando uma grande quantidade de dados provenientes de equipamentos eletrônicos disponíveis na rede. As novas tecnologias chamadas de “*smart grids*” e as fontes de dados que podem ser utilizadas para melhorar a eficiência dos diagnósticos de faltas também são discutidas.

Decanini (2012) apresenta um conjunto independente de redes neurais ARTMAP-Fuzzy para realizar o diagnóstico automático de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica. A teoria da evidência de Dempster-Shafer (BARNET, 2008) é empregada para agregar as informações (diagnósticos) do conjunto de redes neurais, fornecendo, assim, informações quantitativas sobre o estado operativo do sistema e a confiabilidade do diagnóstico.

1.4 Organização do Texto

O presente trabalho foi organizado em seis capítulos e um apêndice. Este primeiro capítulo é introdutório e apresenta a formulação do problema estudado, seus objetivos e contribuições, além de um levantamento bibliográfico das técnicas de localização de faltas e de monitoramento da qualidade da energia desenvolvidas nas últimas décadas. A este capítulo somam-se os seguintes:

No capítulo 2, uma pequena introdução sobre os sistemas de distribuição de energia elétrica é apresentada, englobando os modelos de carga de geração e consumo e o fluxo de carga básico. Em seguida, são apresentados os algoritmos de fluxo de carga e curto-circuito utilizados no sistema de localização de faltas, considerando a existência de malhas fechadas no sistema e a presença de geradores distribuídos conectados diretamente à rede de distribuição. Além dessas técnicas de análises de redes, é também apresentado um resumo dos principais distúrbios de qualidade de energia encontrados em sistemas de distribuição de energia elétrica.

No capítulo 3 são apresentadas as teorias que norteiam os conceitos e aplicações da transformada de Fourier (TF), da transformada wavelet (TW) e das redes neurais artificiais (RNAs), com ênfase à rede neural ARTMAP-Fuzzy.

No capítulo 4 são apresentados os algoritmos inteligentes propostos para resolver os problemas de detecção, localização de faltas e classificação de distúrbios de qualidade de energia em sistemas de distribuição de energia elétrica.

No capítulo 5 os resultados obtidos com a implementação computacional dos algoritmos propostos neste trabalho são apresentados e discutidos.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do estudo e algumas sugestões e considerações para trabalhos futuros.

Por fim, no Apêndice A encontram-se os dados do alimentador real de distribuição de 13,8 kV e 134 barras, utilizado como referência para as simulações apresentadas.

2 Técnicas de Análises de Redes e Distúrbios em SDEE

Neste capítulo são apresentados os algoritmos de fluxo de carga e curto-circuito utilizados no sistema de localização de faltas, considerando a existência de malhas fechadas no sistema e a presença de geradores distribuídos conectados diretamente à rede de distribuição. Além disso, uma introdução sobre os sistemas de distribuição de energia elétrica é apresentada, englobando os modelos de carga de geração e consumo e o fluxo de carga básico, comumente utilizado.

2.1 Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - SDEE

As premissas de projeto e operação dos sistemas elétricos de potência estabelecem as características das formas de onda gerada e a qualidade de tensão fornecida aos consumidores. Desta forma, sabe-se que hoje em dia a eletricidade é gerada e entregue a uma frequência de 50 Hz ou 60 Hz, sendo que as características de qualidade da tensão elétrica podem ser afetadas em vários níveis de um sistema e por causas variadas. Os sistemas de energia são, geralmente, considerados como tendo três divisões principais: geração, transmissão e distribuição. Na Figura 3 apresenta-se um exemplo de um sistema elétrico de potência típico. Na realidade, há muitas exceções, como o fato de que alguns grandes clientes industriais serem servidos por subestações diretamente conectadas ao sistema de transmissão e alguns pequenos geradores poderem alimentar diretamente o sistema de distribuição, conhecidos como geradores distribuídos.

O principal objetivo relacionado ao funcionamento de um sistema elétrico de potência é o fornecimento contínuo de energia, de forma confiável e com um número mínimo de interrupções. Na norma IEEE Std. - 1159 (2009) estabelecem-se as práticas recomendadas para o monitoramento da qualidade da energia elétrica, apresentando uma descrição consistente dos fenômenos eletromagnéticos normalmente observados nos sistemas elétricos de potência.

Figura 3 - Exemplo de um sistema elétrico de potência típico.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Tabela 1 descrevem-se os vários componentes e faixas de tensão típica encontrados em um sistema elétrico de potência.

Tabela 1 - Partes comuns de um sistema elétrico de potência

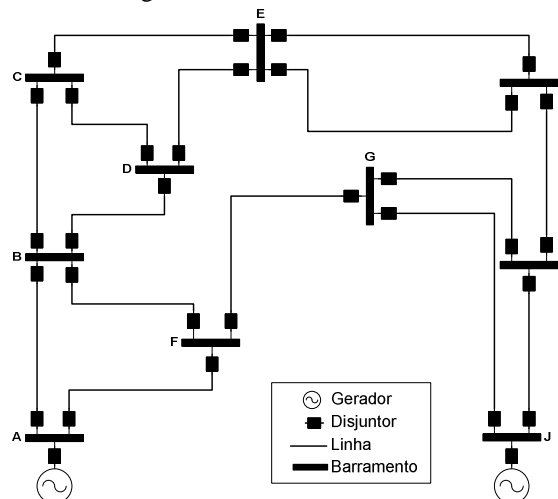
Geração	<ul style="list-style-type: none"> • Converte fontes de energia (combustíveis fósseis, quedas de água, material nuclear, luz solar e outros) em energia elétrica.
Transmissão	<ul style="list-style-type: none"> • Conecta as fontes geradoras às subestações que alimentam as áreas de carga. • Sua tensão de operação geralmente varia entre 230 kV e 765 kV. • São linhas longas com nenhum ou poucos transformadores / consumidores diretamente conectados. • Seu carregamento pode ser limitado pela estabilidade do sistema, controle de tensão ou temperatura dos condutores.
Subtransmissão	<ul style="list-style-type: none"> • Rede de média tensão que conecta as subestações de transmissão e de distribuição. • Sua tensão de operação geralmente varia entre 46 kV e 161 kV.
Distribuição	<ul style="list-style-type: none"> • Rede de média tensão que conecta as subestações de distribuição e os grupos de consumidores. • Sua tensão de operação geralmente varia entre 4 kV e 35 kV. • São linhas curtas com muitos transformadores, ramificações, ramais laterais e consumidores diretamente conectados. • Podem ser linhas aéreas ou subterrâneas (especialmente em grandes centros urbanos ou novas áreas residenciais).

Fonte: IEEE Std. 1250 (2011)

A interconexão entre os sistemas de geração, transmissão e distribuição ocorre em uma subestação elétrica, sendo que nessas subestações podem existir transformadores que aumentam ou diminuem a tensão, dependendo da necessidade. A subestação que tem um transformador elevador (*step-up*) aumenta a tensão, enquanto diminui a corrente, ao passo que um transformador abaixador (*step-down*) diminui a tensão e aumenta a corrente de distribuição. A energia elétrica pode fluir através de diversas subestações, entre usinas geradoras e consumidores, e isso pode levar a uma mudança de níveis de tensão por diversas vezes.

A geração e as linhas de transmissão são normalmente conectadas através de uma rede interligada. Dentro desta rede as linhas de transmissão transportam grandes quantidades de energia por longas distâncias. Na Figura 5 representa-se um sistema de transmissão simples, ilustrando a interconectividade entre as fontes de geração (GEN) e as linhas de transmissão que conectam os barramentos (A, B, C,..., J). Na maioria dos casos, a perda de uma única linha ou gerador não deve causar sobrecargas no restante da rede. Isto oferece um alto grau de confiabilidade, pois o fornecimento de energia pode ser mantido para a maior parte do sistema, mesmo com a perda de uma linha de transmissão ou fonte de geração.

Figura 4 - Linha de transmissão.



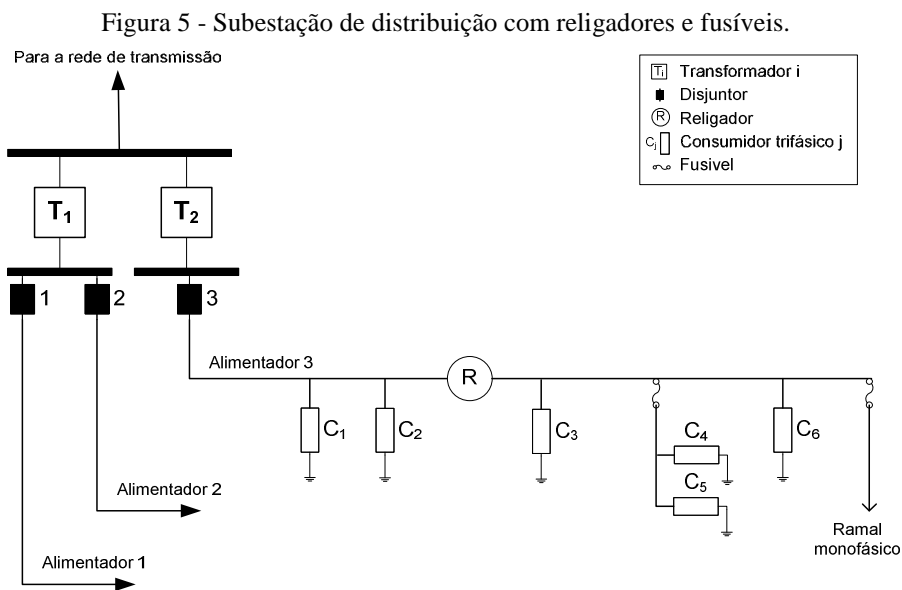
Fonte: IEEE Std. 1250 (2011)

Já as linhas de distribuição, comumente chamadas de redes de distribuição primárias, geralmente não são interligadas. Os sistemas de distribuição são projetados para funcionarem de forma radial, exceto em algumas cidades que usam um esquema de distribuição em malha, o que não é comum.

Portanto, os sistemas de distribuição radiais consistem de uma única fonte de alimentação, originária em uma subestação, na qual a tensão do sistema é reduzida através de transformadores abaixadores, conforme se pode observar na Figura 5.

O sistema de distribuição tem disjuntores que conectam as linhas de distribuição, as quais fornecem energia a muitos clientes, localizados em uma mesma região geográfica. Existem nas linhas de distribuição componentes de proteção conectados à jusante do disjuntor da subestação, tais como religadores automáticos e chaves fusíveis. Estes componentes protegem os sistemas de distribuição, criando situações em que apenas uma parte da linha de distribuição é desenergizada devido à ocorrência de uma falha no sistema.

Os esquemas de proteção destes sistemas são projetados para identificar rapidamente a seção de linha em falta e, em seguida, desconectar ou abrir o componente adequado para isolar a área problemática, interrompendo o fornecimento de energia para o menor número de clientes possível.



Fonte: IEEE Std. 1250 (2011)

Praticamente toda a geração e a transmissão são executadas de forma trifásica e equilibradas. Já as linhas de distribuição, geralmente, deixam a subestação com três condutores de fase, mas, também podem conter linhas laterais que só ofereçam duas fases ou até mesmo uma única fase, dependendo da carga a ser servida. A seguir apresentam-se os modelos de cargas mais utilizados em estudos de fluxo de cargas e análise de faltas em sistemas elétricos de potência.

2.2 Modelos de Cargas: geração e consumo;

O modelo mais conhecido para caracterizar o comportamento estático das cargas é o modelo ZIP, largamente empregado em estudos de fluxo de potência, cujo significado físico é caracterizar o comportamento da carga como uma agregação de parcelas de impedância constante (Z), corrente constante (I) e potência constante (P). As equações do modelo ZIP para representação das potências ativa (P) e reativa (Q) são:

$$P = P_0 \left[\alpha \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + \beta \left(\frac{V}{V_0} \right) + \gamma \right] \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left[\alpha \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + \beta \left(\frac{V}{V_0} \right) + \gamma \right] \quad (2)$$

Sendo:

- P_0 : Potência ativa nominal;
- Q_0 : Potência reativa nominal;
- V_0 : Tensão nominal.

Os parâmetros α , β e γ representam, respectivamente, os percentuais de Impedância Constante (ex: iluminação), Corrente Constante (ex: motores) e Potência Constante (ex: geradores, equipamentos de controle automático de geração/frequência), sujeitos à restrição:

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (3)$$

As equações básicas envolvidas na definição dos modelos de carga são:

$$S_{esp} = V_{esp} \cdot I_{esp}^* \quad (4)$$

$$V_{esp} = Z_{esp} \cdot I_{esp} \quad (5)$$

A equação (4) define a potência em função do fasor da tensão e do fasor corrente conjugada da carga e a equação (5) define a tensão em função dos fasores da impedância e da corrente da carga.

2.2.1 Cargas de Potência Constante;

Neste tipo de representação, a potência da carga é sempre constante, mesmo que haja variação da tensão aplicada em seus terminais. A equação (6) define a potência de uma carga conectada com tensão diferente da nominal.

$$S = V \cdot I^* \quad (6)$$

Considerando que a carga não apresente variação, tem-se que $S = S_{esp}$, assim:

$$V_{esp} \cdot I_{esp}^* = V \cdot I^* \quad (7)$$

Como no algoritmo de fluxo de carga tipo varredura utilizado neste trabalho utilizam-se as injeções de correntes das cargas, o conjugado dessa corrente para a nova condição é dado por:

$$I^* = \frac{V_{esp} \cdot I_{esp}^*}{V} \quad (8)$$

Substituindo (4) em (8), tem-se:

$$I = \left(\frac{S_{esp}}{V} \right)^* \quad (9)$$

A equação (9) define a corrente de uma carga de potência constante para uma carga conectada com tensão diferente da tensão nominal ou especificada.

2.2.2 Cargas de Impedância Constante

Neste tipo de carga a impedância é sempre constante, mesmo havendo variação da tensão aplicada em seus terminais. Combinando-se as equações (4) e (5) pode-se definir a impedância específica de uma carga em função de sua tensão e potência especificadas:

$$Z_{esp} = \frac{|V_{esp}|^2}{S_{esp}^*} \quad (10)$$

Considerando que a carga está conectada com tensão diferente da nominal e que esta não apresenta variação em sua impedância tem-se:

$$I = \frac{V \cdot S_{esp}^*}{|V_{esp}|^2} \quad (11)$$

A equação (11) define a corrente de uma carga de impedância constante quando essa carga está conectada com tensão diferente de sua tensão nominal ou especificada.

2.2.3 Cargas de Corrente Constante

Neste tipo de carga a magnitude da corrente da carga é sempre constante, mesmo havendo variação da tensão aplicada em seus terminais. Pode-se definir a corrente da carga para a condição nominal e para outra não nominal como:

$$I_{esp} = \left(\frac{S_{esp}}{V_{esp}} \right)^* \rightarrow |I_{esp}| \cdot e^{j\gamma_{esp}} = \left| \frac{S_{esp}}{V_{esp}} \right| \cdot e^{j(\theta_{esp} - \varphi_{esp})} \quad (12)$$

$$I = \left(\frac{S}{V} \right)^* \rightarrow |I| \cdot e^{j\gamma} = \left| \frac{S}{V} \right| \cdot e^{j(\theta - \varphi)} \quad (13)$$

Considerando que a magnitude da corrente e o fator de potência da carga sejam sempre constantes, ou seja, $|I| = |I_{esp}|$ e $\cos \varphi = \cos \varphi_{esp}$, tem-se:

$$|I| \cdot e^{j\gamma} = \left| \frac{S}{V} \right| \cdot e^{j(\theta - \varphi_{esp})} \quad (14)$$

$$|S| = \frac{|S_{esp}| \cdot |V|}{|V_{esp}|} \quad (15)$$

Substituindo-se (15) em (14):

$$|I| \cdot e^{j\gamma} = \left| \frac{S_{esp}}{V_{esp}} \right| \cdot e^{j(\theta - \varphi_{esp})} \quad (16)$$

Esta equação pode ser reescrita em termos da nova tensão aplicada aos terminais da carga, ficando:

$$I = \frac{S_{esp}^*}{|V_{esp}|} \cdot \frac{V}{|V|} \quad (17)$$

A equação (17) define a corrente de uma carga de corrente constante quando esta carga está conectada com tensão diferente da tensão nominal especificada.

2.2.4 Cargas Polinomiais (mistas)

A representação de modelos de cargas polinomiais é uma combinação dos modelos de carga de potência constante, corrente constante e impedância constante, assim, o modelo combinado de carga pode ser definido como sendo uma combinação linear das equações (9), (11) e (17), sendo:

$$I = \alpha \cdot \left(\frac{S_{esp}}{V} \right) + \beta \cdot \left(\frac{V \cdot S_{esp}^*}{|V_{esp}|^2} \right) + \gamma \cdot \left(\frac{S_{esp}^* \cdot V}{|V_{esp}| \cdot |V|} \right) \quad (18)$$

Os parâmetros α , β e γ representam, respectivamente, os percentuais de cargas com potência constante, impedância constante e corrente constante, dados pela relação:

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (19)$$

2.2.5 Geração Distribuída: modelos e análises.

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema Elétrico Nacional – PRODIST, define geração distribuída como sendo:

“Centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas – ou não – pelo ONS.” (PRODIST, 2008)

As tecnologias de geração distribuída podem ser categorizadas como renováveis e não renováveis. Na Tabela 2 apresentam-se alguns exemplos dessa categorização.

Tabela 2 - Tipos de tecnologias de geração distribuída.

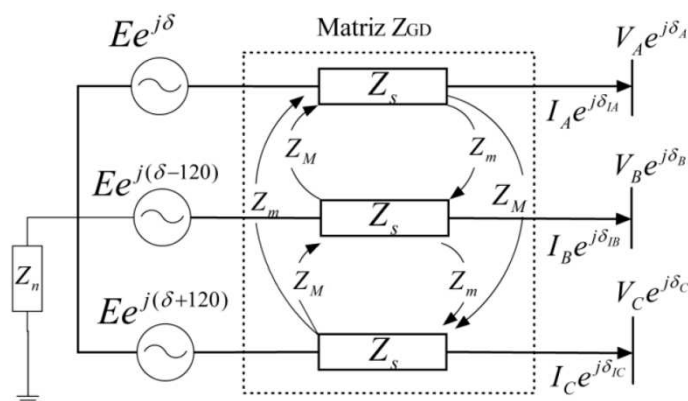
Tecnologias renováveis	Tecnologias não renováveis
Solar / Fotovoltaica;	Gás Natural;
Eólica;	Turbina de combustão;
Geotérmica ou termal;	Ciclo combinado;
Hídrica / Oceânica;	Nuclear.
Biomassa.	

Fonte: elaborado pelo próprio autor

A determinação de um modelo matemático para as máquinas rotativas é um problema complexo devido à suas impedâncias serem governadas por acoplamentos indutivos variantes no tempo. Segundo Simões e Farret (2004), um modelo simples, mas suficientemente completo para simular o comportamento dos geradores distribuídos, pode ser descrito por um conjunto de parâmetros concentrados, Z_s , Z_m e Z_M , representando a impedância própria de cada fase e os acoplamentos mútuos em sequência ABC, e sequência CBA, respectivamente, que dependem da posição relativa do rotor com o campo magnético do estator, conforme ilustrado na Figura 6.

Adicionalmente, a força magneto-motriz induzida na armadura devido à corrente de campo, é simulada por meio de um conjunto de fontes de tensão com módulos iguais E , e defasadas de 120° .

Figura 6 – Circuito equivalente para a máquina síncrona.



Fonte: Simões e Farret (2004)

Para a máquina síncrona da Figura 6, operando como gerador à velocidade síncrona, a equação (20) permite relacionar as correntes I com os níveis de tensão nos terminais. Meneses (2012) descreve em seu trabalho os critérios para calcular os valores das impedâncias internas Z_s , Z_m e Z_M para o gerador síncrono. A corrente I_n que circula pela impedância de aterramento Z_n do gerador obedece à lei de correntes de Kirchhoff, ou seja, $I_n = -(I_A + I_B + I_C)$

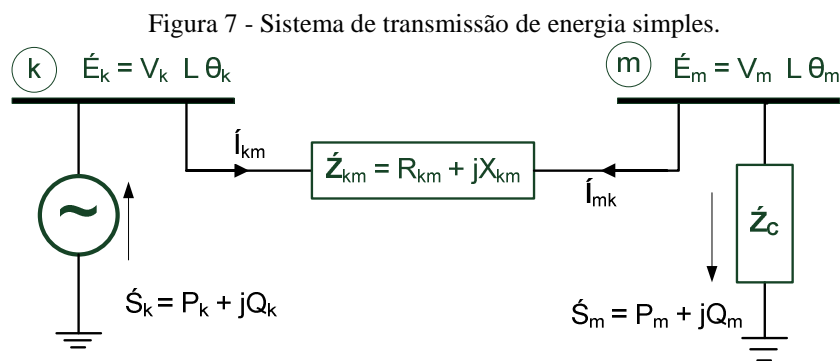
$$\dot{E} = \begin{bmatrix} E e^{j\delta_E} \\ E e^{j(\delta_E-120)} \\ E e^{j(\delta_E+120)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a e^{j\delta_{V_a}} \\ V_b e^{j\delta_{V_b}} \\ V_c e^{j\delta_{V_c}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_M \\ Z_M & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_M & Z_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a e^{j\delta_{I_a}} \\ I_b e^{j\delta_{I_b}} \\ I_c e^{j\delta_{I_c}} \end{bmatrix} + Z_n \begin{bmatrix} I_n \\ I_n \\ I_n \end{bmatrix} \quad (20)$$

2.3 Fluxo de Carga para Redes de Distribuição

O fluxo de carga (do inglês “*load flow*”), também conhecido como fluxo de potência (“*power flow*”), é uma ferramenta muito útil para a análise de redes em regime permanente, sendo muito utilizada na operação em tempo real e no planejamento da expansão e operação dos sistemas elétricos de potência. Através dos estudos de fluxo de carga é possível determinarem-se os carregamentos das linhas de transmissão e (ou) distribuição, transformadores, geradores e equipamentos de compensação de reativos da rede, tais como bancos de capacitores. Podem-se obter também as magnitudes das tensões e correntes nas barras, bem como verificar as perdas na transmissão e distribuição da energia elétrica. Sendo assim, o fluxo de carga é uma ferramenta que permite definir e propor alterações no modo de operação e planejamento da expansão dos sistemas para tornar sua operação mais segura, econômica e confiável.

Do ponto de vista operacional, permite o despacho ótimo de geradores, o controle da tensão na rede através de dispositivos de injeções de reativos, o controle dos *taps* de transformadores, o intercâmbio de cargas com os alimentadores vizinhos e alterações na topologia da rede, dentre outros. Do ponto de vista do planejamento permite a definição dos melhores pontos para a instalação de novas plantas de geração, a seleção e análise dos impactos de novas linhas de transmissão/distribuição e de novos transformadores, a utilização de dispositivos de controle de potência (dispositivos FACTS), o planejamento das interconexões com outros sistemas, etc.

Portanto, um fluxo de carga consiste em obter as condições de operação (magnitude e ângulo de fase das tensões nodais da rede) em regime permanente de um sistema com topologia e níveis de geração/consumo conhecidos. Conhecendo-se os fasores das tensões e o carregamento do sistema (geração e consumo) podem-se determinar os fluxos de potência ativa e reativa que circulam pela rede. Na formulação básica do problema de fluxo de carga são associadas, a cada barra (nó) do sistema, quatro grandezas, conforme se pode observar na Figura 7.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Sendo:

- V_k : Magnitude do fasor tensão nodal da barra k;
- θ_k : Ângulo de fase do fasor tensão nodal da barra k;
- P_k : Injeção líquida (geração – carga) de potência ativa na barra k;
- Q_k : Injeção líquida (geração – carga) de potência reativa na barra k.

Em relação aos ramos da rede compostos por linhas e transformadores, cujos extremos são as barras k e m , associam-se três grandezas, sendo elas:

- \dot{I}_{km} : Fasor da corrente que sai da barra k em direção à barra m;
- P_{km} : Fluxo de potência ativa que sai da barra k em direção à barra m;
- Q_{km} : Fluxo de potência reativa que sai da barra k em direção à barra m;

Geralmente duas grandezas de cada barra são conhecidas e as outras duas devem ser calculadas, sendo estas chamadas de incógnitas do problema. Dependendo de quais são essas incógnitas definem-se quais são os tipos de barras. Na Tabela 3 apresentam-se os tipos mais comuns utilizados nos estudos de fluxo de carga, porém, outros tipos de barras podem ser definidos em função de situações ou operações particulares. Sendo assim, tanto as cargas quanto a geração são consideradas como injeções de potência nas barras.

Tabela 3 – Tipos de barras utilizadas nos estudos de potência.

Tipos de Barras	Notação	Dados	Incógnitas	Observações
Carga	PQ	P_k, Q_k	V_k, θ_k	Tipo mais comum;
Tensão Controlada	PV	P_k, V_k	θ_k, Q_k	Barras com controle de tensão, geração;
Referência	$V\theta$	V_k, θ_k	P_k, Q_k	Necessária para dar a referência angular e fechar o balanço de potência do sistema.

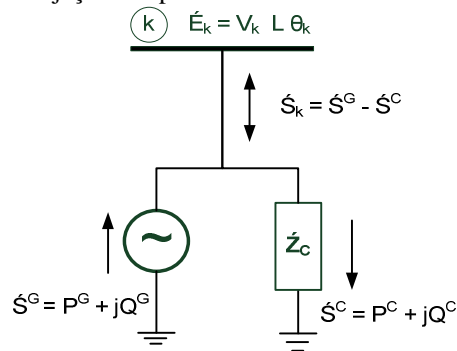
Fonte: elaborado pelo próprio autor

Adota-se como convenção para o sentido das injeções de potência o seguinte:

“A injeção de potência em uma barra k será positiva se entrar na barra como geração e será negativa se sair da barra como carga”.

Esta convenção é válida para todos os elementos shunts da rede. Na Figura 8 apresenta-se um exemplo de geração e consumo presentes em uma barra k do sistema.

Figura 8 - Injeções de potência em uma barra k do sistema.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Sendo:

- P^G : potência ativa gerada na barra k ;
- Q^G : potência reativa gerada na barra k ;
- P^C : potência ativa consumida na barra k ;
- Q^C : potência reativa consumida na barra k .

Se $S_k > 0$ a potência está entrando na barra k (\uparrow) e, portanto, a potência é gerada;

Se $S_k < 0$ a potência está saindo da barra k (\downarrow) e, portanto, a potência é consumida.

Em geral as barras de carga representam os transformadores de distribuição nos quais estão conectados os consumidores ou geradores distribuídos de pequeno porte que não possuem controle de excitação.

Em segundo lugar estão as barras de tensão controlada, que representam os geradores que podem realizar o controle de sua tensão terminal por intermédio de seu controle de excitação e também as barras cuja tensão pode ser controlada através do ajuste do *tap* de

algum transformador. Por último tem-se a barra de referência, sendo esta única e a mais importante na formulação do problema de fluxo de carga devido a dois fatores:

- Necessidade de estipular um ângulo de referência para os cálculos matemáticos (geralmente igual a zero);
- Necessidade de fechar o balanço de potência da rede, pois não é possível definir todas as injeções de potência do sistema antes de se conhecer as perdas nas linhas, que dependem dos fluxos de potência na rede.

As expressões dos fluxos de corrente e das potências ativa e reativa podem ser generalizadas de forma que seja possível utilizar sempre uma mesma equação para expressá-las, fazendo-se apenas algumas considerações para particularizar determinado tipo de equipamento, seja uma linha de transmissão, um transformador em fase ou defasador. Sendo assim, as expressões gerais para os fluxos de corrente são dadas por:

$$\bar{I}_{km} = (a_{km}^2 \bar{Y}_{km} + j b_{km}^{sh}) \bar{V}_k + (-a_{km} e^{-j\varphi_{km}} \bar{Y}_{km}) \bar{V}_m \quad (21)$$

$$\bar{I}_{mk} = (-a_{km} e^{+j\varphi_{km}} \bar{Y}_{km}) \bar{V}_k + (\bar{Y}_{km} + j b_{km}^{sh}) \bar{V}_m \quad (22)$$

De acordo com o tipo de equipamento a ser modelado, as grandezas a_{km} , φ_{km} e b_{km}^{sh} assumem valores particulares, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros para os diferentes tipos de equipamentos nas expressões gerais de fluxo.

EQUIPAMENTO	a_{km}	φ_{km}	b_{km}^{sh}
Linhas	1	0	-
Trafo em fase	-	0	0
Trafo defasador	-	-	0
Trafo defasador puro	1	-	0

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Os fluxos de potência ativa e reativa que circulam pela rede obedecem às seguintes expressões gerais de fluxo:

$$P_{km} = (a_{km} V_k)^2 g_{km} - (a_{km} V_k) V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (23)$$

$$Q_{km} = -(a_{km} V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) - (a_{km} V_k) V_m [g_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (24)$$

Desta forma, as equações (21)-(24) podem ser utilizadas genericamente para o cálculo dos fluxos de potência e correntes que circulam nos sistemas elétricos de potência, bastando utilizar os parâmetros conforme apresentados na Tabela 4.

Assim, tendo em vista as características dos atuais sistemas de distribuição, com baixo nível de automação, e o enfoque proposto para o desenvolvimento deste trabalho, um método de fluxo de carga trifásico do tipo varredura *backward/forward sweep* e soma de correntes (CHENG; SHIRMOHAMMADI, 1995) foi adotado para o desenvolvimento da técnica de localização de falta proposta, porém, com algumas modificações, conforme proposto por Peñuela, Granada e Mantovani (2010). Os métodos de varredura são fáceis de serem implementados computacionalmente e, em geral, alcançam a convergência com baixo número de iterações. Na seção seguinte é apresentado o passo-a-passo do método de fluxo de carga trifásico tipo varredura implementado neste trabalho, considerando sistemas fracamente malhados, com a presença de cargas polinomiais e geração distribuída.

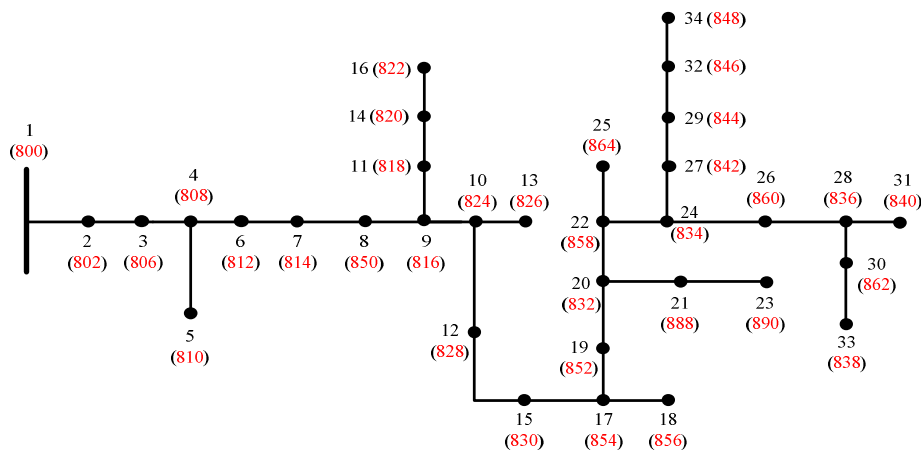
2.3.1 Fluxo de Carga para Redes Trifásicas

Para avaliar o estado operativo de um sistema elétrico é preciso simular a rede através de estudos de fluxo de carga. Tradicionalmente o método de Gauss-Seidel, (CHEN et al., 1990) e o método de Newton-Raphson (ABDEL-AKHER; MOHAMED; ABDUL, 2005) são as ferramentas mais utilizadas para tais finalidades. Porém, as características operativas das redes de distribuição podem fazer com que esses métodos se tornem lentos ou divergentes. Desta forma, é adequada a aplicação de algoritmos baseados no método de varredura como, por exemplo, os métodos propostos por (SHIRMOHAMMADI et al., 1988; CESPEDES, 1990; LUO; SEMLYEN, 1990).

Nas análises efetuadas através de estudos de fluxo de carga em redes de distribuição reais é necessário levar em consideração que as mesmas apresentam comportamento operativo desbalanceado devido, principalmente, à presença de ramais laterais monofásicos e bifásicos e linhas não transpostas. O método proposto por Cheng e Shirmohammadi (1995) foi desenvolvido levando em consideração tais características. Nesta técnica se aproveita a configuração radial, típica dos sistemas de distribuição, para resolver um conjunto de equações de forma ordenada e eficiente e, baseada na técnica da compensação proposta por Tinney (1972), adiciona-se ao algoritmo de fluxo de carga um modelo simplificado de gerador que se comporta como um conjunto balanceado de fontes de corrente. A metodologia da compensação pode ser aplicada juntamente com o algoritmo de fluxo de carga radial para obter a solução de sistemas de distribuição levemente malhados e com presença de geração distribuída.

Uma característica especial dos métodos de fluxo de carga tipo varredura é que os ramos devem ser ordenados em camadas, sendo a primeira delas originada no nó raiz do alimentador. Assim, em cada camada, a numeração dos nós iniciais sempre será menor que a dos nós finais e os ramos de camadas superiores sempre terão uma numeração menor que os ramos das camadas inferiores. Essa forma de ordenar os nós e ramos é utilizada pelo algoritmo durante o cálculo das correntes nos ramos (passo *backward*) e durante o cálculo das tensões nodais (passo *forward*) do processo de varredura. Na Figura 9, ilustra-se o esquema de renumeração em camadas do alimentador de distribuição IEEE 34 barras (KERSTING, 1991). Os números entre parênteses representam a numeração original das barras do sistema.

Figura 9 - Esquema de renumeração de barras da rede de distribuição IEEE 34 barras.



Fonte: Kersting (1991).

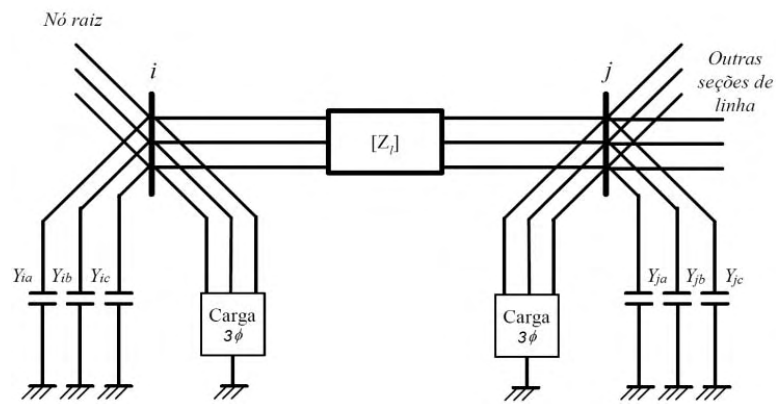
Técnicas computacionais eficientes para realizar a renumeração das barras do sistema e determinar os pontos de quebra em sistemas fracamente malhados podem ser encontradas em Shirmohammadi et al. (1988) e em Luo e Semlyen (1990). De acordo com Cheng e Shirmohammadi (1995), a seleção dos pontos de quebra dos anéis (ou malhas) não afeta sensivelmente a convergência global do algoritmo de varredura.

No algoritmo de fluxo de carga trifásico, cada nó ou ramo da rede é numerado com um único índice, independentemente do número de fases presentes. A impedância série de uma determinada seção de linha l é representada por uma matriz 3×3 :

$$Z_l = \begin{bmatrix} Z_{aa,l} & Z_{ab,l} & Z_{ac,l} \\ Z_{ab,l} & Z_{bb,l} & Z_{bc,l} \\ Z_{ac,l} & Z_{bc,l} & Z_{cc,l} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Na equação (25) os elementos da diagonal principal representam as impedâncias próprias das fases enquanto que os elementos fora da diagonal representam as impedâncias mútuas entre as fases. Se alguma das fases dessa seção de linha não existir, devem-se zerar os valores correspondentes à fase que não está presente na configuração da rede, ou seja, em seções de linha que apresentam características bifásicas ou monofásicas, as linhas e colunas correspondentes às fases inexistentes devem ser zeradas na matriz Z_l . Na Figura 10, apresenta-se uma seção de linha l trifásica entre os nós i e j , com as admitâncias shunts (Y) e cargas trifásicas conectadas.

Figura 10 - Representação de uma linha l trifásica com cargas conectadas.



Fonte: Cheng e Shirmohammadi (1995).

O nó raiz é considerado como nó de referência, no qual as magnitudes e os ângulos das tensões das fases são conhecidos. Para iniciar o algoritmo de fluxo de carga considera-se que as tensões iniciais, para todos os nós do alimentador, sejam iguais às tensões do nó de referência.

O processo iterativo do algoritmo de fluxo de carga consiste basicamente de cinco passos, sendo que para a n -ésima iteração tem-se:

1. Cálculo das Injeções de Correntes nos Nós.

$$\begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \end{bmatrix}^{(n)} = \begin{bmatrix} \alpha \cdot \left(\frac{S_{ia}^{esp}}{V_{ia}^{(n-1)}} \right)^* + \beta \cdot \left(\frac{S_{ia}^{esp} \cdot V_{ia}^{(n-1)}}{|V_{esp}|^2} \right) + \gamma \cdot \left(\frac{(S_{ia}^{esp})^* \cdot V_{ia}^{(n-1)}}{|V_{esp}| \cdot |V_{ia}^{(n-1)}|} \right) \\ \alpha \cdot \left(\frac{S_{ib}^{esp}}{V_{ib}^{(n-1)}} \right)^* + \beta \cdot \left(\frac{S_{ib}^{esp} \cdot V_{ib}^{(n-1)}}{|V_{esp}|^2} \right) + \gamma \cdot \left(\frac{(S_{ib}^{esp})^* \cdot V_{ib}^{(n-1)}}{|V_{esp}| \cdot |V_{ib}^{(n-1)}|} \right) \\ \alpha \cdot \left(\frac{S_{ic}^{esp}}{V_{ic}^{(n-1)}} \right)^* + \beta \cdot \left(\frac{S_{ic}^{esp} \cdot V_{ic}^{(n-1)}}{|V_{esp}|^2} \right) + \gamma \cdot \left(\frac{(S_{ic}^{esp})^* \cdot V_{ic}^{(n-1)}}{|V_{esp}| \cdot |V_{ic}^{(n-1)}|} \right) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ia}^* & & \\ & Y_{ib}^* & \\ & & Y_{ic}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^{(n-1)} \quad (26)$$

Sendo:

- I_{ia}, I_{ib}, I_{ic} : injeções de corrente no nó i correspondente às cargas polinomiais e elementos shunt;
- S_{ia}, S_{ib}, S_{ic} : cargas conectadas ao nó i ;
- V_{ia}, V_{ib}, V_{ic} : tensões no nó i ;
- Y_{ia}, Y_{ib}, Y_{ic} : admitâncias de todos os elementos shunts conectados ao nó i ;
- α, β, γ : percentuais das cargas ZIP.

No caso de existir uma fonte de corrente conectada à barra i , a equação (27) é aplicada:

$$I_{i,a,b,c}^{(n)} = I_{i,a,b,c}^{(n)} + I_{g,i,a,b,c}^{(n)} \quad (27)$$

Sendo:

- $I_{g,i,a,b,c}^{(n)}$: corrente fornecida pelos geradores distribuídos conectados à barra i na iteração n .

2. Cálculo das Correntes nos Ramos – Passo *Backward*

Iniciando-se na seção de linha da última camada e movendo-se em direção ao nó raiz, a corrente J na seção de linha l é dada por:

$$\begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \end{bmatrix}^{(n)} = - \begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \end{bmatrix}^{(n)} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} J_{ma} \\ J_{mb} \\ J_{mc} \end{bmatrix}^{(n)} \quad (28)$$

Sendo:

- J_{la}, J_{lb}, J_{lc} : correntes fluindo na seção de linha l ;
- I_{ja}, I_{jb}, I_{jc} : injeções de correntes das cargas conectadas ao nó j ;
- J_{ma}, J_{mb}, J_{mc} : correntes fluindo na seção de linha m ;
- M : Conjunto de seções de linha conectadas ao nó j .

Na equação (28), o sinal negativo é introduzido para manter a consistência com as injeções de correntes calculadas na equação (26).

3. Cálculo das Tensões Nodais – Passo *Forward*

Iniciando-se na primeira camada e movendo-se em direção à última camada, as tensões no nó j são dadas por:

$$\begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jb} \\ V_{jc} \end{bmatrix}^{(n)} = \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^{(n)} - \begin{bmatrix} Z_{aa,l} & Z_{ab,l} & Z_{ac,l} \\ Z_{ab,l} & Z_{bb,l} & Z_{bc,l} \\ Z_{ac,l} & Z_{bc,l} & Z_{cc,l} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \end{bmatrix} \quad (29)$$

4. Cálculo da Potência Fornecida pelos Geradores Distribuídos

Os geradores distribuídos podem ser simulados como um dispositivo que opera com base nas medições da componente de sequência positiva da tensão no ponto de acoplamento com a rede para, assim, agir no módulo e na fase da tensão interna. Sendo assim, dependendo do tipo de controle empregado, pode-se calcular o nível de tensão de referência de sequência positiva E_{gd}^1 e, conseqüentemente, o valor da tensão de referência E_{gd}^{ref} utilizado para calcular as correntes nos pontos de quebra (equação (30)).

$$E_{gd}^{ref} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1.e^{-j\frac{2\pi}{3}} & 1.e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ 1 & 1.e^{j\frac{2\pi}{3}} & 1.e^{-j\frac{2\pi}{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ E_{gd}^1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Portanto, para os tipos de controle adotados neste trabalho tem-se:

a) Controle das potências ativas e reativas – Controle PQ

Neste tipo de controle os geradores são ajustados para fornecer valores constantes de potência ativa P e reativa Q . Sendo assim, a equação (31) é utilizada para calcular o valor da tensão interna de sequência positiva do gerador distribuído:

$$E_{gd}^1 = V_{gd}^1 + Z_{gd}^1 \left(\frac{P + jQ}{V_{gd}^1} \right)^* \quad (31)$$

Sendo:

- V_{gd}^1 : nível de tensão de sequência positiva nos terminais do gerador;
- Z_{gd}^1 : impedância de sequência positiva do gerador distribuído.

V_{gd}^1 é obtido após transformar o vetor de tensões nos terminais do gerador V_{gd}^{abc} para o sistema de componentes de seqüências, através da equação (32).

$$\begin{bmatrix} |V^0| \\ |V^1| \\ |V^2| \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1.e^{j\frac{2\pi}{3}} & 1.e^{-j\frac{2\pi}{3}} \\ 1 & 1.e^{-j\frac{2\pi}{3}} & 1.e^{j\frac{2\pi}{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} |V_a| \\ |V_b| \\ |V_c| \end{bmatrix} \quad (32)$$

b) Controle da potência ativa e do nível de tensão – Controle PV

Neste tipo de controle os geradores são ajustados para fornecer valores constantes de potência ativa P e manter constante o nível de tensão de sequência positiva V_{gd} nos terminais do gerador. Sendo assim, a equação (33) é utilizada para calcular o valor da tensão interna de sequência positiva do gerador distribuído:

$$E_{gd}^1 = V_{gd} \cdot e^{j\delta_v} + Z_{gd}^1 \left(\frac{P + jQ_g^{(n)}}{V_{gd} \cdot e^{j\delta_v}} \right)^* \quad (33)$$

O valor da potência reativa despachada na iteração n ($Q_g^{(n)}$) deve ser atualizado a cada nova iteração do algoritmo através da equação (34):

$$Q_g^{(n)} = Q_g^{(n-1)} + \Delta Q_g \quad (34)$$

Sendo assim, deve-se calcular o valor de ΔQ_g para que o módulo da tensão de sequência positiva V_{gd}^1 atinja o valor especificado V_{gd} . Esse valor pode ser estimado usando o algoritmo de compensação proposto por Luo e Semlyen (1990), através da equação (35).

$$[X][\Delta Q] = |V_{gd}^1 - V_{gd}| \quad (35)$$

Sendo:

X : matriz de reatâncias de sequência positiva da submatriz Z_g , desconsiderando as impedâncias internas dos geradores.

Para se aplicar essa equação é necessário construir a matriz de sensibilidade Z_s dos pontos de quebra, equação (36), composta pelos blocos de matrizes Z_q , Z_g , e Z_{qg} .

$$Z_s = \begin{bmatrix} Z_q & Z_{qg} \\ Z_{qg} & Z_g \end{bmatrix} \quad (36)$$

A submatriz Z_q é formada pelo somatório das impedâncias das linhas do sistema de distribuição que conectam a barra q, com a barra do ponto de quebra q'. A submatriz Z_g é constituída pelo somatório das impedâncias das linhas que interligam o gerador distribuído com a subestação, incluindo-se a matriz de impedâncias internas do gerador. Por fim, a submatriz Z_{qg} é composta pelo somatório das linhas compartilhadas pelos blocos Z_q e Z_g .

5. Cálculo das Correntes nos Pontos de Quebra

Peñuela et al. (2010) verificaram que a atualização das correntes nos pontos de abertura de malha pode ser feita logo após a atualização dos níveis de tensão nodais, sendo desnecessário realizar todo o processo iterativo até a convergência do algoritmo de fluxo de carga radial, como proposto anteriormente por Cheng e Shirmohammadi (1995).

Neste passo, tanto as correntes nos pontos de abertura de malha I_q quanto as correntes fornecidas pelos geradores distribuídos I_{gd} são calculadas e atualizadas, a cada nova iteração n , através da equação (37).

$$\begin{bmatrix} I_{q_x} \\ I_{gd_y} \end{bmatrix}^{(n)} = \begin{bmatrix} I_{q_x} \\ I_{gd_y} \end{bmatrix}^{(n-1)} + \begin{bmatrix} \Delta I_{q_x} \\ \Delta I_{gd_y} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Sendo:

- I_{q_x} : correntes que simulam o efeito da malha x ;
- I_{gd_y} : correntes fornecidas pelo gerador distribuído y ;

As correções das correntes nos pontos de quebra para as malhas (ΔI_q^x) e para os geradores distribuídos (ΔI_{gd}^y) são calculadas através da equação (38):

$$\begin{bmatrix} Z_q & Z_{qg} \\ Z_{qg} & Z_g \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_{q_x} \\ \Delta I_{gd_y} \end{bmatrix}^{(n)} = \begin{bmatrix} \Delta V_{pp'} \\ \Delta E_{gd_y} \end{bmatrix}^{(n)} = \begin{bmatrix} V_p - V_{p'} \\ E_{gd} - E_{gd}^{ref} \end{bmatrix}^{(n)} \quad (38)$$

Sendo:

- V_p : tensão no ponto p da abertura de malha;
- $V_{p'}$: tensão no ponto p' da abertura de malha;

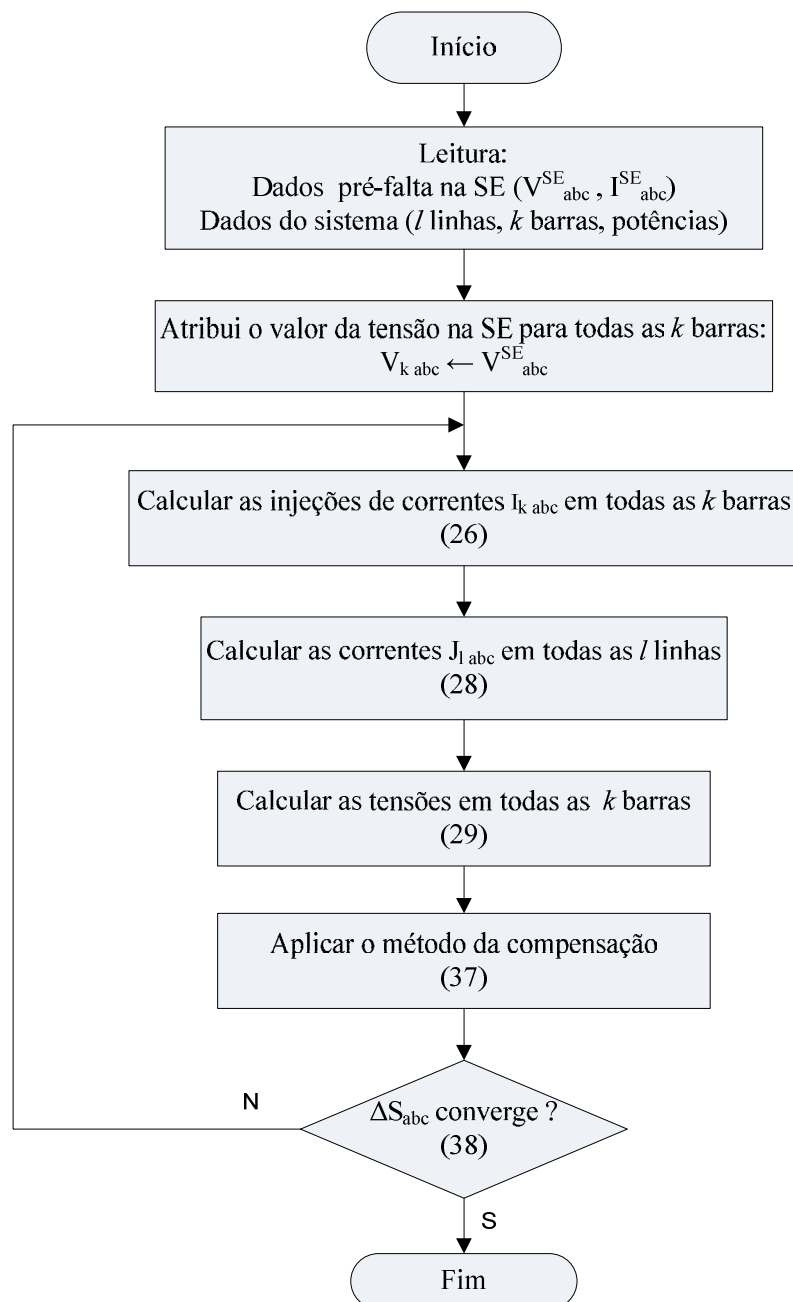
Uma vez que os cinco passos descritos acima foram executados, os desvios de potência são calculados para todas as fases de cada nó, de acordo com a equação abaixo:

$$\begin{bmatrix} \Delta S_{ia}^{(n)} \\ \Delta S_{ib}^{(n)} \\ \Delta S_{ic}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ia}^{(n)} \cdot I_{ia}^{*(n)} - Y_{ia} \cdot |V_{ia}|^{2(n)} - S_{ia}^{esp} \cdot \left(\alpha \cdot \left(\frac{|V_{ia}|^{(n)}}{|V_{esp}|} \right)^0 + \gamma \cdot \left(\frac{|V_{ia}|^{(n)}}{|V_{esp}|} \right)^1 + \beta \cdot \left(\frac{|V_{ia}|^{(n)}}{|V_{esp}|} \right)^2 \right) \\ V_{ib}^{(n)} \cdot I_{ib}^{*(n)} - Y_{ib} \cdot |V_{ib}|^{2(n)} - S_{ib}^{esp} \cdot \left(\alpha \cdot \left(\frac{|V_{ib}|^{(n)}}{|V_{esp}|} \right)^0 + \gamma \cdot \left(\frac{|V_{ib}|^{(n)}}{|V_{esp}|} \right)^1 + \beta \cdot \left(\frac{|V_{ib}|^{(n)}}{|V_{esp}|} \right)^2 \right) \\ V_{ic}^{(n)} \cdot I_{ic}^{*(n)} - Y_{ic} \cdot |V_{ic}|^{2(n)} - S_{ic}^{esp} \cdot \left(\alpha \cdot \left(\frac{|V_{ic}|^{(n)}}{|V_{esp}|} \right)^0 + \gamma \cdot \left(\frac{|V_{ic}|^{(n)}}{|V_{esp}|} \right)^1 + \beta \cdot \left(\frac{|V_{ic}|^{(n)}}{|V_{esp}|} \right)^2 \right) \end{bmatrix} \quad (39)$$

Os cinco passos são repetidos até que todos os desvios de potências se encontrem dentro de uma tolerância de convergência preestabelecida.

As equações (26) e (39) foram formuladas para cargas polinomiais que apresentam característica combinada dos tipos potência constante, impedância constante e corrente constante. Durante a análise de faltas, devido a grande variação das tensões e a presença de uma alta corrente fluindo pela rede de distribuição, é importante considerar a existência desse modelo misto na modelagem das cargas conectadas no alimentador. Na Figura 11 ilustra-se o fluxograma do algoritmo de fluxo de carga implementado neste trabalho.

Figura 11 – Fluxograma do algoritmo de fluxo de carga.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

2.4 Análises de Curto-Circuito

Outro tipo de estudo utilizado na análise de sistemas de distribuição são os chamados estudos de curto-circuito nos quais, tradicionalmente, tem sido aplicado o método das componentes simétricas (SELVAN; SWARUP, 2008), por ser eficiente e de fácil implementação. Todavia, inconvenientes aparecem ao aplicar o método das componentes simétricas nos sistemas de distribuição, visto que os acoplamentos magnéticos entre as fases, geralmente, não são iguais. Assim, tentar transformar o conjunto de impedâncias de linha da representação por fase para o sistema de sequências gera acoplamentos entre as redes de sequência que impedem o desacoplamento em redes de sequência positiva, negativa e zero, criando-se, portanto, um sistema tão complexo quanto o sistema original. Devido a este aspecto, as últimas pesquisas para cálculo de curto-circuito em sistemas de distribuição são direcionadas à análise usando a representação por fase, nas quais se aplicam os métodos baseados na matriz de admitâncias - Y_{bus} (CHEN et al., 1992) ou na matriz de impedâncias - Z_{bus} (BERMAN; XU, 1998). Recentemente, a metodologia da compensação tem atraído especial interesse, logo depois que Zhang et al. (1995) apresentaram as vantagens computacionais e simplicidade desta técnica, permitindo a inclusão de malhas e geração distribuída na representação por fase.

O algoritmo desenvolvido para as análises de curto-circuito baseia-se no algoritmo proposto por Zhang et al. (1995), o qual, por sua vez, baseia-se no algoritmo de fluxo de carga para sistemas de distribuição fracamente malhados, proposto por Cheng e Shirmohammadi (1995). O nível de corrente de curto-circuito em qualquer rede elétrica depende, entre outros fatores, da impedância de falta. O modelo matemático proposto para a análise de curto-circuito, em componentes de fase, desconsidera o efeito desta impedância, já que o uso de injeções de correntes faz com que não seja necessária nenhuma hipótese com relação à impedância de falta, visto que esta não aparece na modelagem da falta.

Sendo assim, as correntes de faltas podem ser estimadas considerando-se que sejam conhecidas as tensões e correntes em todas as barras do sistema (fluxo de potência pré-falta), e a corrente total medida na SE. Portanto, uma falta no sistema de distribuição pode ser tratada como sendo uma carga conectada ao sistema. A cada iteração a corrente de falta I_{abc}^{falta} é calculada através da equação (40) sendo, então, injetada no nó sob análise.

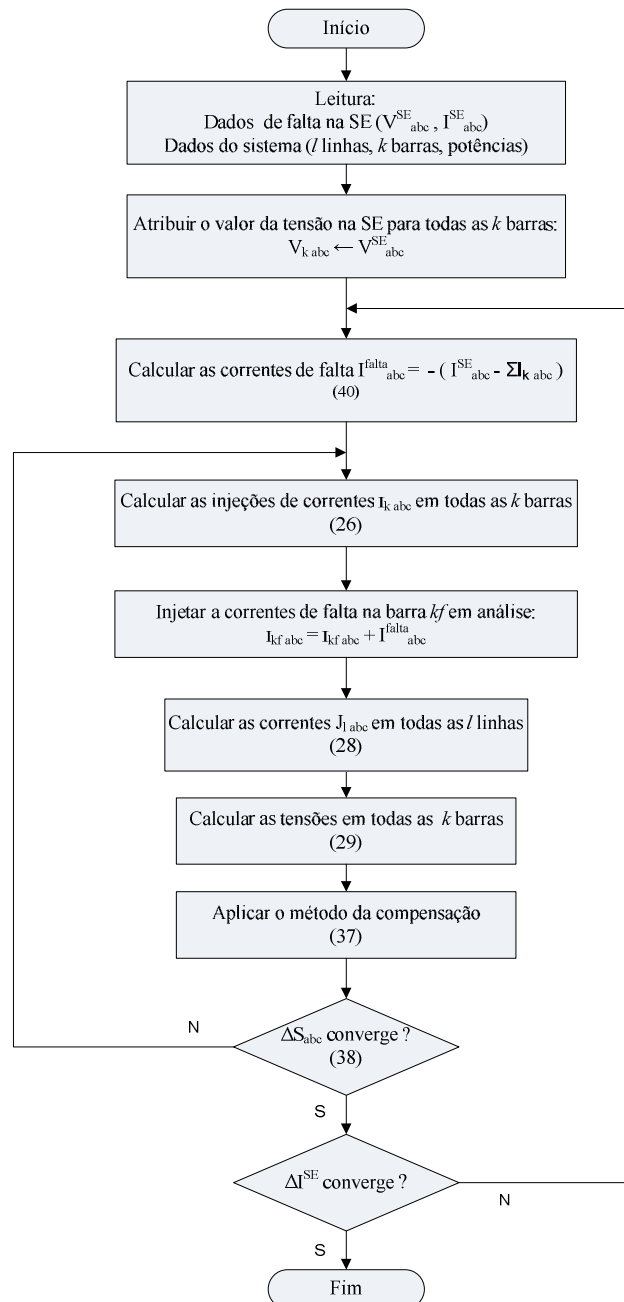
$$I_{abc}^{falta} = I_{abc}^{SE} - \sum_{k=1}^{nb} I_{kabc} \quad (40)$$

Sendo:

- I_{abc}^{SE} : corrente medida na SE;
 I_{kabc} : corrente calculada para a barra k ;
 nb : Número total de barras do sistema.

No caso do algoritmo desenvolvido, tem-se a vantagem de se reutilizar a matriz de sensibilidade descrita pela equação (38), sendo desnecessário expandir a matriz para considerar a trajetória fechada gerada pelo ponto de contato com a terra formado durante a falta, tal como proposto por Zhang et al. (1995). Na Figura 12 ilustra-se o fluxograma do algoritmo de cálculo de curto-circuito elaborado neste trabalho.

Figura 12 – Fluxograma do algoritmo de cálculo de curto-circuito.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para melhor entender o procedimento adotado para o cálculo de curto-circuito apresentado na Figura 12, descreve-se a seguir o passo a passo dos cálculos realizados para a obtenção das correntes de curto-circuito:

Passo 1: Realizar a leitura dos dados de falta na SE (V_{abc}^{SE} , I_{abc}^{SE}), dados de configuração do sistema (l linhas, k barras, n transformadores, etc) e atribui-se o valor da tensão pré-falta medido na SE para todas as k barras do sistema;

Passo 2: Estimar a corrente de falta I_{abc}^{falta} através da diferença entre a corrente registrada na SE (I_{abc}^{SE}) e a somatória de correntes calculadas para todas as barras de carga do sistema;

Passo 3: Calcular as injeções de correntes em todas as k barras através da equação (26), adicionando a corrente de falta I_{abc}^{falta} , calculada no passo 2, à barra kf em análise, supostamente em falta;

Passo 4: Calcular as correntes (J_{1abc}) que circulam nas l linhas através da equação (28) – passo backward;

Passo 5: Calcular as tensões (V_{kabc}) em todas as k barras do sistema através da equação (29);

Passo 6: Aplicar o método da compensação, como proposto anteriormente por Cheng e Shirmohammadi (1995), através da equação (37) ;

Passo 7: Verificar a convergência do fluxo de potência trifásico através das variações de potência de todas as barras com cargas instaladas, através da equação (38). Se o fluxo convergiu, ir para o passo 7, caso contrário, retornar ao passo 3;

Passo 8: Verificar a convergência das correntes de curto circuito através da diferença entre as correntes medidas na SE e a somatória de correntes calculadas para todas as barras do sistema;

Passo 9: Se as correntes convergiram, finaliza-se o processo, pois a corrente de curto-circuito foi estimada com sucesso e o fluxo de potência convergiu para o caso de uma falta simulada na barra kf . Caso contrário, retornar ao passo 2.

Peñuela et al. (2010) propuseram que a atualização das correntes nos pontos de abertura de malha e de instalação dos geradores distribuídos – equação (37) – fosse feita logo após a atualização dos níveis de tensão nodais – equação (29) – tornando, assim, desnecessário realizar todo o processo iterativo até a convergência do algoritmo de fluxo de carga radial, conforme proposto anteriormente por Zhang et al. (1995). Neste caso, tanto as correntes nos pontos de abertura de malha I_q quanto as correntes fornecidas pelos geradores distribuídos I_{gd} são calculadas e atualizadas, a cada nova iteração n , através da equação (37), além das correntes de curtos-circuitos, que devem ser acrescentadas à matriz de sensibilidade. Nas duas proposições acima a matriz de sensibilidade, e sua inversa, devem ser recalculadas toda vez que haja uma alteração no ponto considerado em falta.

Assim, a diferença fundamental entre o algoritmo proposto neste trabalho para o cálculo de curto-circuito e o algoritmo proposto por Peñuela et al. (2010) consiste na separação das informações de curto-circuito na matriz de sensibilidade, ou seja, ao se montar a matriz de sensibilidade utilizam-se apenas as informações das malhas e geradores distribuídos, sendo que a análise de curto-circuito é feita separadamente. Isto somente é possível porque foram utilizadas não somente as informações das tensões trifásicas medidas na subestação, mas também as informações das correntes trifásicas, o que permite estimar a corrente de curto-circuito separadamente. Esta separação de informações, além de estimar com melhor precisão as correntes de curtos-circuitos, por utilizar dados reais de medição, auxilia no desempenho do algoritmo de cálculo de curto-circuito porque torna desnecessário o recálculo da matriz de sensibilidade, que deve ser montada e invertida apenas uma única vez, no início do algoritmo.

Portanto, esta ferramenta de cálculo de curto-circuito mostrou-se muito eficiente durante as análises feitas com o algoritmo de localização de faltas desenvolvido neste trabalho, que necessita simular faltas em diversas barras do sistema e, assim, executar muitas vezes o algoritmo de cálculo de curto-circuito apresentado nesta seção.

2.5 Distúrbios de Qualidade de Energia

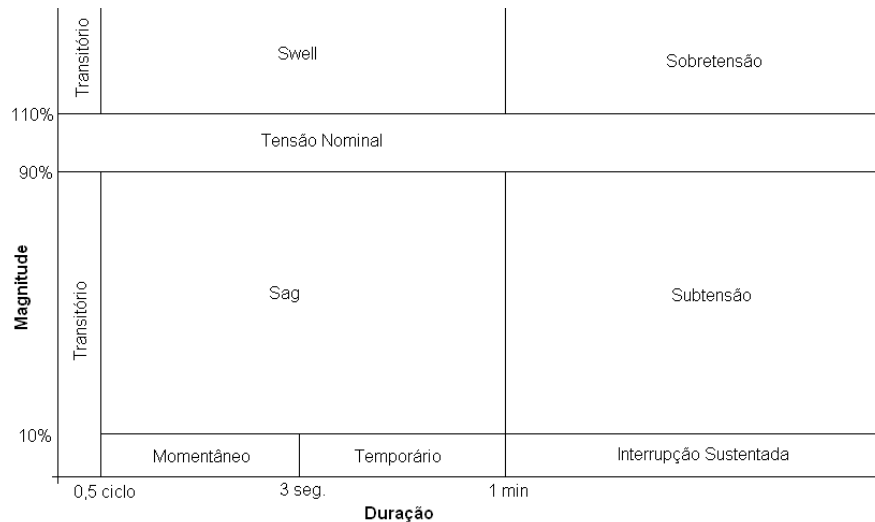
A Qualidade da Energia Elétrica (QEE) é caracterizada pela disponibilidade da energia através de uma forma de onda senoidal pura, sem alterações em sua amplitude e frequência. No entanto, situações transitórias em sistemas de potência são comuns e estas situações podem provocar inúmeras interferências indesejáveis. O termo “qualidade de energia”, em seu sentido amplo, pode ser interpretado como qualidade de serviço, englobando três aspectos: confiabilidade, qualidade de energia oferecida e provisão de informação. (PRODIST, 2008)

Uma definição mais restrita está relacionada à habilidade do sistema elétrico de operar cargas sem danificá-las e a habilidade de cargas operarem no sistema sem perturbar ou reduzir a eficiência do mesmo. A definição utilizada neste trabalho é a mesma utilizada por Bollen e Gu (2006) que define a Qualidade de Energia (QE) como uma combinação da qualidade da tensão e da qualidade da corrente. A qualidade da tensão está relacionada com os desvios da tensão real em relação à tensão ideal e a qualidade da corrente é definida de forma equivalente, sendo o desvio da corrente real em relação ao seu valor ideal. A tensão ideal pode ser definida como uma onda de tensão senoidal com amplitude e frequência constantes, onde tanto a amplitude quanto a frequência são iguais ao seu valor nominal. A corrente ideal também apresenta amplitude e frequência constantes. Qualquer desvio de tensão ou corrente do ideal é definido como um distúrbio de qualidade de energia. Sendo assim, uma determinada perturbação pode ser uma perturbação de tensão ou de corrente, mas, muitas vezes, não é possível distinguir entre os dois. Qualquer mudança na corrente causa uma mudança na tensão e vice-versa. Quando usamos uma distinção entre distúrbios de tensão e corrente, usamos a causa como um critério para distinguir entre eles: distúrbios de tensão são provenientes da rede de energia e afetam os clientes, já as perturbações de corrente são originadas nos clientes e, potencialmente, afetam o sistema.

Considerando a forma de onda de tensão, podemos encontrar vários tipos de eventos como *notches*, presença de harmônicos, faltas, afundamentos de tensão (*sag*), sobretensão (*swell*), *flickers*, impulsos (*spikes*), transitórios de chaveamento, etc. A presença desses fenômenos indesejáveis no sistema elétrico pode causar o mau funcionamento de equipamentos eletrônicos, sistemas de proteção, interferência em sistemas de comunicação, etc. Estes eventos podem ter duração menor que 0,5 ciclo, em transitórios impulsivos, até vários minutos, em afundamentos de tensão.

Na Figura 13 apresentam-se as definições da Norma IEEE Std.1159 (2009) para os problemas na magnitude das tensões, com seus respectivos tempos de duração.

Figura 13 – Problemas na magnitude de tensão segundo a Norma IEEE Std.1159.



Fonte: IEEE Std.1159 (2009)

Existe uma grande variedade de fenômenos elétricos que são considerados distúrbios de qualidade de energia e, quando presentes nos sistemas de potência, podem causar sérios prejuízos, tanto às concessionárias quanto aos consumidores, sendo estes: a) eventos de curta duração, como afundamentos ou sobre tensões que durem poucos ciclos ou até alguns segundos causados por faltas em alimentadores ou pela conexão de grandes cargas ao sistema; b) eventos que durem menos de um ciclo, tais como transientes causados pelo chaveamento de capacitores, descargas elétricas, etc.; c) eventos de longas durações como harmônicos e *flickers*. Na Tabela 5 apresentam-se, de forma resumida, os fenômenos que se relacionam com a QE, com suas respectivas causas, efeitos e algumas propostas de soluções para mitigar tais fenômenos.

Tabela 5 - Resumo das características dos distúrbios relacionados com a QE.

Tipo de Distúrbio	Causas	Efeitos	Soluções
Transitórios Impulsivos	-Descargas atmosféricas; -Chaveamentos de cargas.	-Excitação de circuitos ressonantes; -Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	-Filtros; -Supressores de surto; -Transformadores isoladores.
Oscilações Transitórias	-Descargas atmosféricas; -Chaveamentos de: capacitores, linhas, cabos, cargas e transformadores.	-Mau funcionamento de equipamentos controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.; -Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	-Filtros; -Supressores de surto; -Transformadores isoladores.

Subtensões e Sobreensões	-Partidas de motores; -Variações de cargas; -Chaveamento de banco capacitores.	-Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores; -Falhas em equipamentos eletrônicos; -Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TP's e TC's; -Operação indevida de relés de proteção.	-Reguladores de tensão; -Fontes de energia de reserva; -Chaves estáticas; -Geradores de energia.
Interrupções	-Curto-circuito; -Operação de disjuntores; -Manutenção.	-Falha de equipamentos eletrônicos e de iluminação; -Desligamento de equipamentos; -Interrupção do processo produtivo (altos custos);	-Fontes de energia sobressalentes; -Sistemas <i>no-break</i> ; -Geradores de energia.
Desequilíbrios	-Fornos a arco; -Cargas monofásicas e bifásicas; -Assimetrias entre as impedâncias.	-Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas; -Geração, pelos retificadores, de 3º harmônico e seus múltiplos.	-Operação simétrica; -Dispositivos de compensação.
Nível CC	-Operação ideal de retificadores de meia onda, etc.	-Saturação de transformadores; -Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e de outros conectores.	
Harmônicos	-Cargas não lineares.	-Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; -Danificação de capacitores, etc.	-Filtros; -Transformadores isoladores.
Inter-harmônicos	-Conversores estáticos de potência; -Ciclo conversores; -Motores de indução; -Equipamentos a arco, etc.	-Interferência na transmissão de sinais <i>Carrier</i> ; -Indução de <i>flicker</i> visual no <i>display</i> de equipamentos.	
Notching	-Equipamentos de eletrônica de potência.		
Ruídos	-Chaveamento de eq. eletrônicos de potência; -Radiações eletromagnéticas.	-Distúrbios em eq. eletrônicos (computadores e controladores programáveis).	-Aterramento das instalações; -Filtros.
Oscilações de Tensão	-Cargas intermitentes; -Fornos a arco; -Partidas de motores.	- <i>Flicker</i> ; -Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas; -Queda de rendimento de equipamentos elétricos; -Interferência nos sistemas de proteção.	-Sistemas estáticos de compensação de reativos; -Capacitores série.
Variações na Frequência do Sistema Elétrico	-Perda de geração, perda de linhas de transmissão, etc.	-Pode causar danos severos nos geradores e nas palhetas das turbinas, etc.	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No Brasil existe uma preocupação crescente no sentido de padronizar o controle da qualidade dos serviços de energia elétrica. Para tanto, existem resoluções governamentais (por exemplo, a Resolução Normativa n. 345, de 16 de dezembro de 2008, publicada no Diário Oficial da União – DOU em 31 de dezembro de 2008.) que aprova os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, estabelecendo as obrigações das concessionárias com relação à avaliação do desempenho de seus sistemas através de medidas de confiabilidade e, inclusive, estabelecendo valores limites a serem observados e periodicidade das avaliações.

Os Procedimentos de Distribuição – PRODIST são normas que disciplinam o relacionamento entre as distribuidoras de energia elétrica e os demais agentes (unidades consumidoras e centrais geradoras) conectados aos sistemas de distribuição, que incluem redes e linhas com tensões inferiores a 230 kV. Tratam, também, do relacionamento entre as distribuidoras e a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, no que diz respeito ao intercâmbio de informações.

O Módulo Oito do PRODIST estabelece os procedimentos relativos à Qualidade da Energia Elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. Para a qualidade do produto, o módulo define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE. Para a qualidade dos serviços prestados, o módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento às ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

Os fenômenos elétricos podem ser divididos em categorias de acordo com o seu tempo de duração, seu conteúdo espectral, bem como sua amplitude típica. Seguindo estes princípios, os diferentes distúrbios são subdivididos em: transitórios, variações de tensão de curta duração, variações de tensão de longa duração, desequilíbrio de tensão, distorções na forma de onda, flutuação de tensão e variações da frequência do sistema. Características importantes para a classificação dos eventos de qualidade de energia são apresentadas a seguir, como a duração do evento, seu espectro harmônico, suas possíveis causas e os possíveis danos causados às cargas sujeitas a estes distúrbios.

A Tabela 6 traz um resumo dos diferentes tipos de distúrbios, mostrando as categorias e as características típicas dos fenômenos que contribuem para a perda da qualidade do fornecimento de energia.

Tabela 6 - Categorias e características dos fenômenos de qualidade de energia elétrica.

Categoria	Conteúdo Espectral	Duração	Amplitude
1.0 – Transitórios			
1.1 – Impulsivos			
1.1.1 – Nanossegundo	5 ns	< 50 ns	
1.1.2 – Microssegundo	1 µs	50 ns – 1 ms	
1.1.3 – Milissegundo	0,1 ms	> 1 ms	
1.2 – Oscilatórios			
1.2.1 – Baixa Frequência	< 5 kHz	3 – 50 ms	0,4 pu
1.2.2 – Média Frequência	5 – 500 kHz	20 µs	0,4 pu
1.2.3 – Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5 µs	0,4 pu
2.0 – Variações de Tensão Curta Duração			
2.1 – Instantânea			
2.1.1 – Afundamento de Tensão		0.5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.1.2 – Elevação de Tensão		0.5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
2.2 – Momentânea			
2.2.1 – Interrupção		0.5 ciclos – 3 s	< 0.1 pu
2.2.2 - Afundamento de Tensão		30 ciclos – 3 s	0,1 – 0,9 pu
2.2.3 - Elevação de Tensão		30 ciclos – 3 s	1,1 – 1,4 pu
2.3 – Temporária			
2.3.1 – Interrupção		3 s – 1 minuto	< 0,1 pu
2.3.2 – Afundamento de Tensão		3 s – 1 minuto	0,1 – 0,9 pu
2.3.3 - Elevação de Tensão		3 s – 1 minuto	1,1 – 1,2 pu
3.0 – Variações de Tensão de Longa Duração			
3.1 – Interrupção Sustentada		> 1 minuto	< 0,1 pu
3.2 – Subtensão Sustentada		> 1 minuto	0,8 – 0,9 pu
3.3 – Sobretensão Sustentada		> 1 minuto	1,1 – 1,2 pu
4.0 – Desequilíbrios			
4.1 - Tensão		regime permanente	0,5 – 2%
4.2 - Corrente		regime permanente	1,0 – 30%
5.0 – Distorções da Forma de Onda			
5.1 – Nível CC		regime permanente	0 – 0,1%
5.2 – Harmônicos	0 – 9 kHz	regime permanente	0 – 20%
5.3 – Inter-harmônicos	0 – 9 kHz	regime permanente	0 – 2%
5.4 - Notching	faixa ampla	regime permanente	
5.5 – Ruído	faixa ampla	regime permanente	0 – 1%
6.0 – Flutuações de Tensão	< 25 Hz	intermitente	0,1 – 7%
7.0 – Variações da Frequência do Sistema	0 – 1 Hz	< 10 s	± 0,1 Hz

Fonte: Dugan et al. (1996)

3 Técnicas de Análises de Sinais e Redes Neurais Artificiais

Neste capítulo são apresentados todos os embasamentos teóricos relativos às técnicas de análises de sinais, em particular à aplicação da Transformada de Fourier, da Transformada Wavelet e da Análise Multirresolução, e os embasamentos teóricos relativos às Redes Neurais Artificiais, especificamente relacionados às redes ARTMAP-Fuzzy.

3.1 Transformada de Fourier

A Transformada Discreta de Fourier (EMBREE; DANIELI, 1999), do inglês *Discrete Fourier Transform* – DFT – é uma ferramenta extremamente valiosa para a análise na frequência de sinais discretos no tempo. Como a representação na forma de sequência numérica é natural para computadores digitais, a DFT permite manipular informações no domínio da frequência da mesma forma que se podem manipular as sequências temporais originais, assim, através da aplicação da DFT em amostras do sinal capturadas durante a ocorrência de uma falta, pode-se obter o espectro de frequências deste sinal, além da magnitude e da fase de cada uma das frequências que o compõem. Obtém-se, desta maneira, os fasores das tensões e correntes pré e durante a falta, utilizados pelo algoritmo de localização de faltas. Devido a esta importante característica de extração fasorial é que se optou por utilizar a metodologia apresentada a seguir.

Sendo $x[n]$ uma sequência com comprimento finito M , tal que $x[n] = 0$ para $n < 0$ e $n > M$, define-se a transformada discreta de Fourier de $x[n]$, $DFT_N\{x[n]\}$, de comprimento N , como:

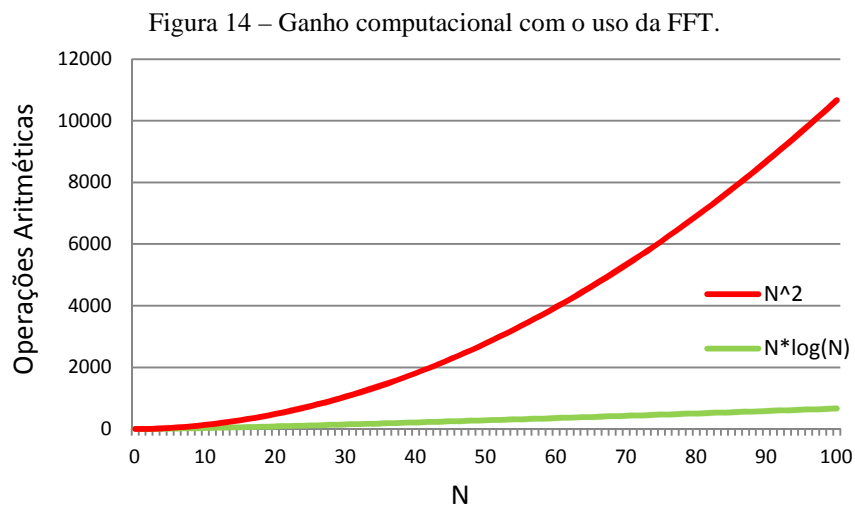
$$\begin{aligned} DFT_N\{x[n]\} &= X(k); \quad 0 \leq k \leq N - 1 \\ &\cong \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \end{aligned} \quad (41)$$

Para simplificar a notação, é prática comum usar $W_N^{kn} = e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}$. A relação entre o comprimento N escolhido para a transformada discreta e o comprimento M da sequência $x[n]$ é muito importante. Considerando os casos em que $N > M$, pode-se sempre considerar que o comprimento de $x[n]$, para efeito da transformada discreta é N . Fazendo-se isto, está adicionando-se $(N - M)$ zeros á direita da sequência $x[n]$, os quais não alteram as suas propriedades básicas. Esta operação é conhecida na literatura como “zero padding”.

A importância da DFT é aumentada, ainda, pelo fato de que existem algoritmos computacionais eficientes para seu cálculo, chamados de Transformada Rápida de Fourier, do inglês *Fast Fourier Transform* – FFT. Segundo Heideman et al. (1984), as suas origens remontam a 1805 com os trabalhos de Carl Friedrich Gauss, mas foi só a partir de 1965 que essas técnicas tiveram maior desenvolvimento e ganharam importância prática com a publicação do algoritmo proposto por Cooley e Tukey (1965).

O princípio básico da FFT é a realização do cálculo de uma dada DFT de comprimento N , com base em DFTs de menor comprimento, através de uma decomposição da sequência de entrada ou da sequência de saída em subsequências sucessivamente menores, tirando partido das propriedades de simetria e periodicidade dos coeficientes W_{kn}^N . Se a decomposição é relativa à sequência de entrada, o algoritmo FFT correspondente é conhecido como decimação no tempo (*decimation in time* - DIT) e se a decomposição é relativa à sequência de saída, o algoritmo correspondente chama-se decimação na frequência (*decimation in frequency* - DIF). No caso de N ser uma potência de dois, o custo computacional do algoritmo DIT ou DIF é proporcional a $N * \log_2(N)$ o que, relativamente ao cálculo direto (N^2), representa um ganho computacional de $\frac{N}{\log_2(N)}$, como se ilustra na

Figura 14:



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Admitindo-se que N seja uma potência de dois, ou seja, $N = 2^\lambda$, com $\lambda > 0$ e inteiro, o algoritmo FFT de decimação na frequência – DIF – decompõe o cálculo da DFT de comprimento N em DFTs mais curtas, dividindo, sucessivamente, a sequência de saída em duas subsequências com metade do comprimento. A primeira sequência correspondente às

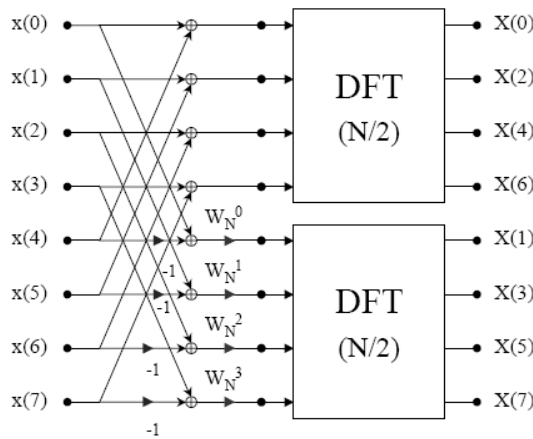
amostras de índice par, e a outra correspondente às amostras de índice ímpar. Assim, para o primeiro nível de decomposição tem-se:

$$\begin{aligned}
 X[2\ell] &= \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{2\ell n} = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[n]W_N^{2\ell n} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x\left[n + \frac{N}{2}\right]W_N^{2\ell\left(n+\frac{N}{2}\right)} \\
 &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[n]W_{\frac{N}{2}}^{\ell n} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x\left[n + \frac{N}{2}\right]W_{\frac{N}{2}}^{\ell n} = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} \left(x[n] + x\left[n + \frac{N}{2}\right]\right)W_{\frac{N}{2}}^{\ell n}
 \end{aligned}
 \tag{42}$$

$$\begin{aligned}
 X[2\ell + 1] &= \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{(2\ell+1)n} = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[n]W_N^{(2\ell+1)n} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x\left[n + \frac{N}{2}\right]W_N^{(2\ell+1)\left(n+\frac{N}{2}\right)} \\
 &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} \left(x[n] - x\left[n + \frac{N}{2}\right]\right)W_N^n W_{\frac{N}{2}}^{\ell n}
 \end{aligned}
 \tag{43}$$

Para $N = 8$, as equações anteriores configuram a seguinte estrutura:

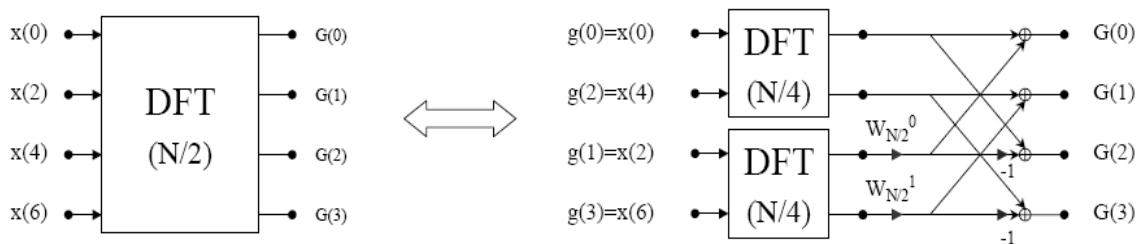
Figura 15 – Decomposição da DFT em duas subsequências.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

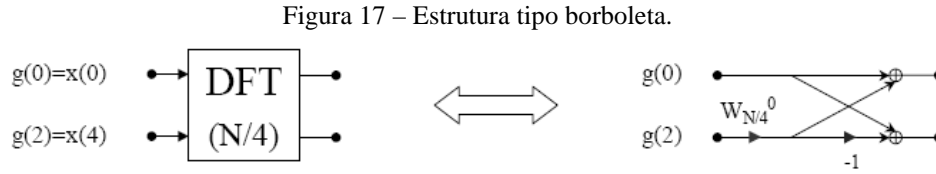
O procedimento anterior pode ainda ser repetido em relação a cada DFT de comprimento $N/2$. Por exemplo, a DFT de comprimento $N/2$ pode ser substituída pela subestrutura da Figura 16.

Figura 16 – Decomposição subsequente das DFTs.



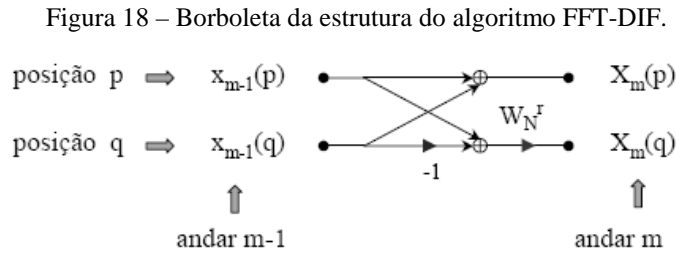
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para o exemplo considerado ($N = 8$) existe mais uma possibilidade de otimização computacional, que é relativa ao cálculo das DFTs de comprimento $N/4 = 2$. Esta pode ser simplificada como se ilustra na Figura 17.



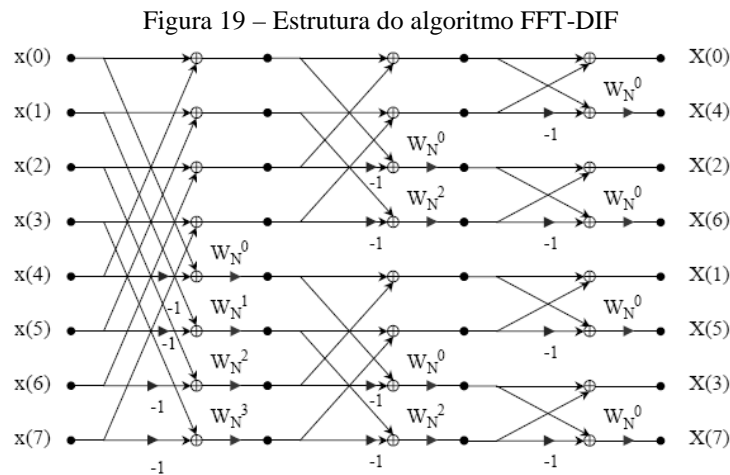
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Esta estrutura elementar de cálculo, designada na literatura como “borboleta” devido à sua forma, tem um custo computacional igual a uma multiplicação e duas adições complexas. A borboleta do algoritmo DIF é mostrada na Figura 18.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Se esta estrutura for substituída na anterior e esta, por sua vez, na inicial, ter-se-á a estrutura global apresentada na Figura 19.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Se o número de entradas ou saídas por borboleta é dois, diz-se que o algoritmo é de raiz-2 (“radix-2”), neste pressuposto:

- O número de borboletas por nível é constante e igual a $N/2$,
- De andar para andar, o número de grupos varia por um fator de dois, e o número de borboletas em cada andar varia inversamente pelo mesmo fator.

A unidade básica de cálculo, que é a borboleta, produz uma saída que substitui os valores de sua entrada, não afetando outras posições da estrutura de dados em cada andar, o que propicia ao processamento paralelo, mas, também permite o chamado cálculo “in-place”, ou seja, os dados de entrada vão sendo substituídos por novos valores de estágio para estágio, não havendo necessidade de memória adicional.

As entradas do algoritmo DIF encontram-se ordenadas sequencialmente, porém, suas saídas apresentam-se segundo uma ordem reversa (“*bit-reversed*”), o que exige reordenação para repor a ordem sequencial original.

Em aplicações práticas envolvendo a amostragem de sinais pode-se obter somente uma gravação finita do sinal. Isso resulta em uma forma de onda truncada que possui características espectrais diferentes do sinal original. Tal descontinuidade pode causar a perda de informação espectral. Uma maneira de se aumentar as características espectrais de um sinal amostrado é através da aplicação de janelas sobre o mesmo, ou seja, através do janelamento do sinal. Ao analisar uma sequência de dados finita através das Análises de Fourier ou outro método de análise espectral, o janelamento minimiza as margens de transições em formas de onda truncadas reduzindo, dessa maneira, a perda espectral.

Existem várias razões para a utilização do janelamento de sinais, sendo algumas delas:

- Definição da duração do período de observação do sinal.
- Redução da perda espectral.
- Separação de um sinal de pequena amplitude de um sinal de grande amplitude com frequências muito próximas uma das outras.

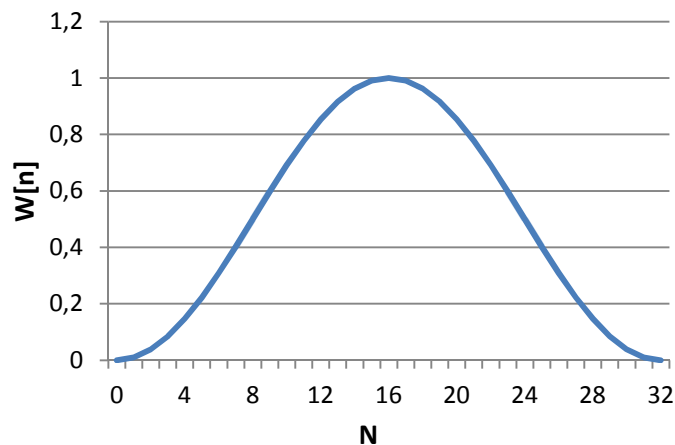
Aplicar uma janela a um sinal no domínio do tempo é equivalente a multiplicar o sinal pela função que representa a janela. Devido à multiplicação no domínio do tempo ser equivalente à convolução no domínio da frequência, o espectro de um sinal janelado representa a convolução do espectro do sinal original com o espectro da janela. Desta forma, o janelamento modifica a forma do sinal tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Existem vários tipos de janelas disponíveis para análises.

A janela utilizada no desenvolvimento deste trabalho foi a janela de Hanning que possui uma forma similar aquela de meio ciclo de uma forma de onda cossenoidal, definida através da equação (44).

$$w[n] = 0,5 - 0,5\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (44)$$

A Figura 20 apresenta a janela de Hanning calculada com um número de amostras igual a 32, ou seja, para $N = 32$

Figura 20 – Janela de Hanning .



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

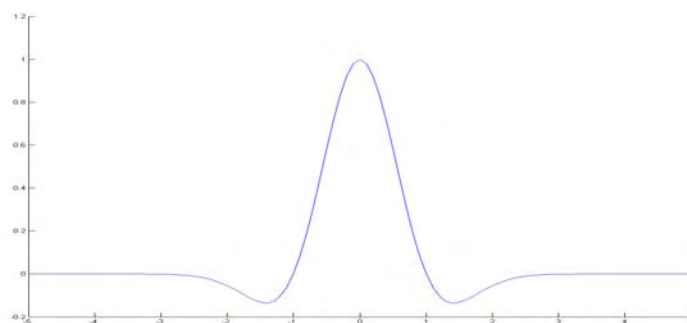
A janela de Hanning é útil para a análise de transientes maiores que o tempo de duração da janela e também para aplicações de objetivos gerais.

3.2 Transformada Wavelet

A Transformada Wavelet (TW) vem sendo largamente empregada em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica devido a sua aplicabilidade na análise de sinais não estacionários, a exemplo dos sinais transitórios oriundos de faltas e distúrbios de QEE (KIM; AGGARWAL, 2001). É uma ferramenta matemática para análise de sinais similar à Transformada de Fourier (TF), representando um desenvolvimento relativamente recente na análise de sinais e que tem gerado bastante interesse por parte da comunidade acadêmica.

A TW decompõe um sinal em diferentes escalas, com diferentes níveis de resolução, a partir de uma única função denominada “wavelet mãe”. Através dos diferentes níveis de decomposição, podem-se evidenciar as faixas de frequência do sinal em análise. Diferentemente da TF, que fornece uma representação global do sinal, a TW apresenta representações locais no domínio do tempo e da frequência de um dado sinal. Em outras palavras, a TW decompõe uma função em um conjunto de funções especiais chamadas wavelets. As wavelets são funções resultantes da atuação simultânea de duas operações (escalamento e translação) em uma única função denominada “wavelet mãe”. Normalmente a função wavelet mãe recebe o nome de seu criador e, atualmente, existem diversas wavelets mães, dentre as quais as mais conhecidas são: Daubechies, Meyer, Haar, Morlet, Lemarié, e outras. Na Figura 21 ilustra-se a wavelet mãe conhecida como “Chapéu Mexicano” (do inglês “*Mexican Hat*”). Esta wavelet não tem nenhuma função escala e é derivada de uma função que é proporcional à segunda derivada da função densidade de probabilidade gaussiana.

Figura 21 - Wavelet mãe tipo chapéu mexicano.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Teoria Wavelet exige-se que a energia das wavelets filhas seja igual à energia da wavelet mãe que as gerou. Esta condição permite que quaisquer coeficientes wavelet, em qualquer escala, possam ser comparados. Matematicamente, uma função $\psi(t)$, para ser considerada uma wavelet mãe, deve pertencer ao espaço $L^2(\mathbb{R})$ e satisfazer a seguinte condição:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (45)$$

Sendo assim, uma wavelet mãe é uma função que oscila, tem energia finita e valor médio nulo. As wavelets filhas são geradas a partir de operações de escalamento (parâmetro a) e translação (parâmetro b) efetuadas na wavelet mãe, ou seja:

$$\psi_{a,b}(t) = \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (46)$$

Segundo Daubechies (1992), assume-se que:

$$\|\psi_{a,b}(t)\| = \|\psi\| \quad (47)$$

e

$$\|\psi\| = 1 \quad (48)$$

Para garantir que as wavelets filhas tenham a mesma energia da wavelet mãe, aplica-se a condição de energia unitária da wavelet mãe (equação (48)) para as wavelets filhas, assim:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^2\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) * \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = 1 \quad (49)$$

Fazendo: $\xi = \frac{t-b}{a}$ e $dt = a d\xi$ tem-se:

$$a \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(\xi) * \psi(\xi) d\xi = 1 \quad (50)$$

Portanto, para que a energia das wavelets filhas seja igual à energia da wavelet mãe, o fator a deve ser eliminado da equação (50). Esta eliminação se dá através da multiplicação por um fator constante igual a $1/\sqrt{a}$. Com isso garantem-se energias unitárias para todas as wavelets filhas em todas as escalas. Deste modo a equação (46) toma a forma:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (51)$$

Existem duas versões diferentes da TW, a contínua e a discreta:

- Transformada Wavelet Contínua (TWC): Faz o mapeamento de uma função de uma grandeza contínua em uma função de duas grandezas contínuas.
- Transformada Wavelet Discreta (TWD): Decompõe um sinal discretizado em diferentes níveis de resolução.

3.2.1 Transformada Wavelet Contínua

Na Teoria Wavelet a wavelet mãe sempre deve ser mencionada, pois a representação no domínio wavelet é função da wavelet mãe escolhida. As considerações estabelecidas para uma determinada transformada serão totalmente inválidas para outra transformada, caso as wavelets mães utilizadas não forem as mesmas. Desta forma, costuma-se afirmar: “Transformada Wavelet de uma função $f(t)$ com relação à wavelet mãe $\psi(t)$ ”. Supondo que $\psi(t)$ seja uma wavelet mãe, a TWC de uma função $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ é dada por:

$$TWC(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \cdot dt \quad (52)$$

Sendo a o fator de escala e b o fator de translação e ambas as grandezas sendo contínuas. A equação (52) mostra que o sinal unidimensional original $f(t)$ é mapeado em uma nova função com espaço bidimensional, em escala a e translação b , pela TW. Um coeficiente da TW, $TWC(a,b)$, de uma escala e translação particulares, representa o quão bem corresponde o sinal original $f(t)$ com a wavelet mãe. Desse modo, o grupo de coeficientes $TWC(a,b)$ associados a um sinal particular é a representação wavelet do sinal original $f(t)$ em relação à wavelet mãe $\psi(t)$. Pode-se visualizar a wavelet mãe como uma função janela. O fator de escala a e o tamanho da janela são interdependentes, onde menores escalas implicam em menores janelas.

Assim, torna-se possível analisar as componentes de baixas frequências de um sinal com um pequeno fator de escala e componentes de altas frequências com fatores de escala maiores. Isto nos permite captar todas as características de um sinal particular. Portanto, a TWC é uma operação de produto interno, o qual pode ser interpretado como uma medida de semelhança entre a função $f(t)$ e cada uma das wavelets filhas. No contexto de processamento de sinais a TW comporta-se como uma operação de filtragem do sinal de entrada $f(t)$.

3.2.2 Transformada Wavelet Discreta

Embora a TWC seja de grande interesse teórico, principalmente para a derivação e compreensão de suas propriedades matemáticas, sua discretização é necessária para a utilização em aplicações práticas. Portanto, a Transformada Wavelet Discreta (TWD) é atraente do ponto de vista computacional, sendo que sua discretização ocorre no domínio dos parâmetros escala e translação e não da variável independente do sinal analisado (tempo ou espaço). O objetivo da TWD é a generalização da função de expansão, de maneira que qualquer sinal em $L^2(\mathbb{R})$ possa ser representado pela série (BURRUS; GOPINATH; GUO, 1998):

$$f(t) = \sum_{j,k} a_{j,k} 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (53)$$

A Transformada Wavelet Discreta (TWD) de uma função $f(n)$ pode ser simplificada pela equação (54):

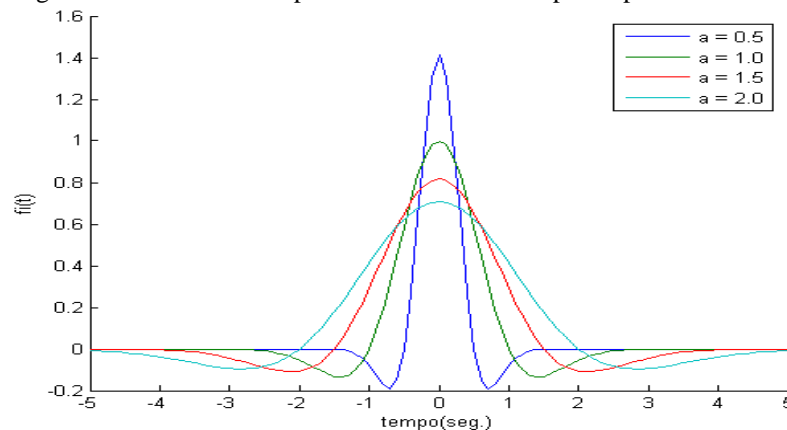
$$(TWD)(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \cdot \sum f(n) \cdot \psi\left(\frac{x - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (54)$$

Onde ψ é a wavelet mãe e os parâmetros a (escala) e b (translação), relativos à equação (52), são funções dos parâmetros inteiros m e n , ou seja, $a = a_0^m$ e $b = nb_0 a_0^m$.

3.2.3 Escalamento

A ideia fundamental na Teoria Wavelet é a operação de escalamento realizada pelo parâmetro a . O escalamento possibilita a compressão ($a < 1$) ou dilatação ($a > 1$) da função wavelet mãe $\psi(t)$. A wavelet mãe escalada e deslocada no tempo (translação) origina as wavelets filhas. Na Figura 22 mostram-se algumas wavelets filhas derivadas da wavelet mãe apresentada na Figura 21. Pode-se observar que as wavelets filhas possuem a mesma forma da wavelet mãe.

Figura 22 - Escalamento aplicado à wavelet mãe tipo chapéu mexicano.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Fica claro através da Figura 22 que, quanto menor o fator de escala, mais “contraída” será a Wavelet. Na análise Wavelet, a escala está diretamente relacionada com a frequência do sinal, o que corresponde a:

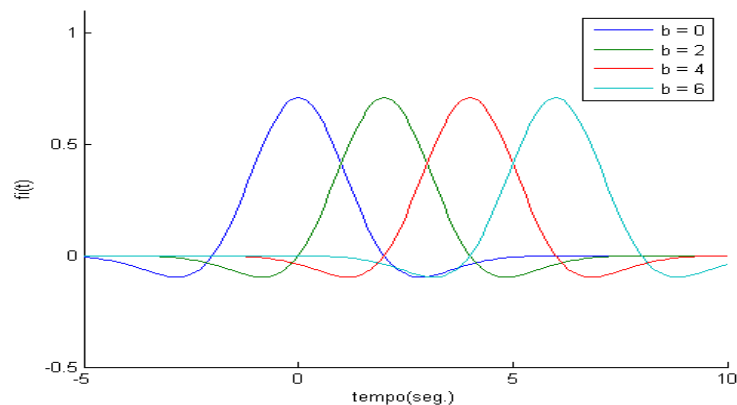
Baixa escala ($a < 1$) → Wavelet contraída → detalhes que mudam rapidamente (alta frequência).

Alta escala ($a > 1$) → Wavelet dilatada → detalhes que mudam vagorosamente (baixa frequência).

3.2.4 Translação

Transladar uma Wavelet significa atrasá-la ou adiantá-la em relação ao eixo das abscissas. Isto é o que se faz matematicamente quando se escreve $f(t-b)$, sendo um atraso na função $f(t)$ de um fator b , como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 - Translação aplicada à wavelet mãe tipo chapéu mexicano, para $t=0$.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

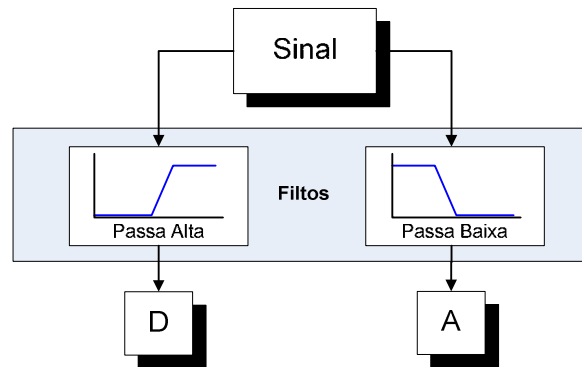
3.2.5 Análise Multirresolução

A Análise Multirresolução (AMR) refere-se ao procedimento para se obter “Aproximações”, através de filtros passa-baixa, e “Detalhes”, através de filtros passa-alta, do sinal original. Uma aproximação é a representação em baixa resolução de um sinal, enquanto um detalhe é a diferença entre duas sucessivas representações em baixa resolução do sinal original. A aproximação corresponde às baixas frequências do sinal original, enquanto um detalhe engloba o conteúdo de alta frequência do sinal. Aproximações e detalhes são obtidos através de um processo sucessivo de convolução. O sinal original é dividido em diferentes escalas de resolução, particularmente em diferentes frequências, como no caso da análise de Fourier. Sendo assim, filtrar um sinal $f(t)$ implica em eliminar determinadas frequências, ou uma banda de frequência deste sinal. Na teoria de processamento de sinais, isto implica em realizar uma convolução do sinal para a resposta impulso do filtro.

O processo de filtragem representa uma forma de realização da técnica de Análise Multirresolução de uma maneira bastante prática. Este processo baseia-se na filtragem de um sinal a ser analisado através de bancos de filtros passa alta e passa baixa, fornecendo versões do sinal original relativos aos coeficientes de funções Wavelets e funções escalas, respectivamente.

Considerando-se a TW em suas formas Contínua e Discreta, definem-se usualmente em aproximações e detalhes. As aproximações são as altas escalas, ou seja, as componentes de baixa frequência do sinal e os detalhes são as baixas escalas, ou seja, as componentes de alta frequência. O processo de filtragem é mostrado abaixo na Figura 24, de maneira simplificada, considerando-se somente o primeiro nível de decomposição do sinal.

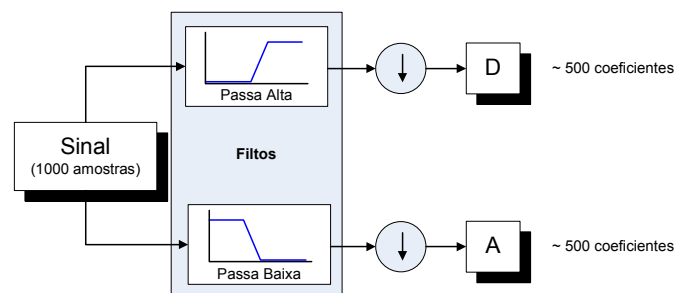
Figura 24 - Processo de filtragem de um sinal.



Fonte: o próprio autor.

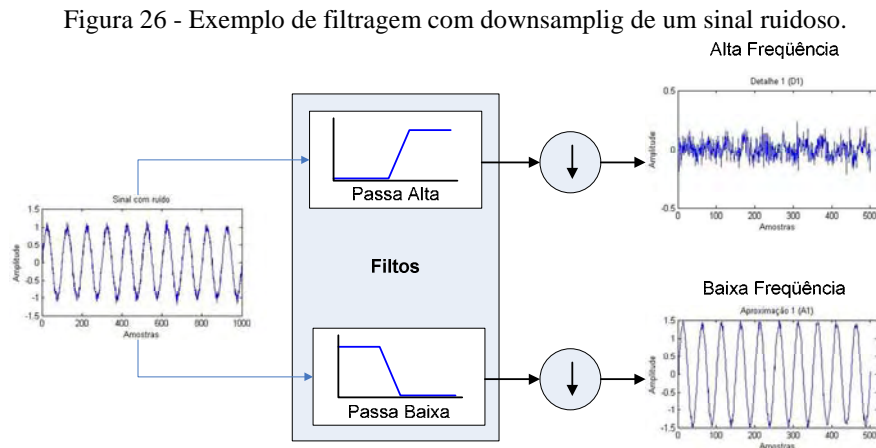
O sinal original passa através de dois filtros complementares que fornecem como saída outros dois sinais. Utilizando-se esse esquema em um sinal digital real, tem-se uma quantidade de dados duas vezes maior em relação aos dados iniciais. Supondo-se que o sinal original consista de 1000 amostras, as versões aproximadas (A) e detalhadas (D) do sinal original terão 1000 amostras cada uma, totalizando 2000 amostras. Para corrigir este problema, foi introduzido um operador que diminui o número de amostras (operador downsampling) (BURRUS; GOPINATH; GUO, 1998), que considera dados intercalados, ou seja, considera o primeiro dado, rejeita o segundo, e assim por diante. Na Figura 25 ilustra-se a operação do operador downsampling, representado pelo símbolo \downarrow .

Figura 25 - Processo de diminuição do número de amostras (downsampling).



Fonte: o próprio autor.

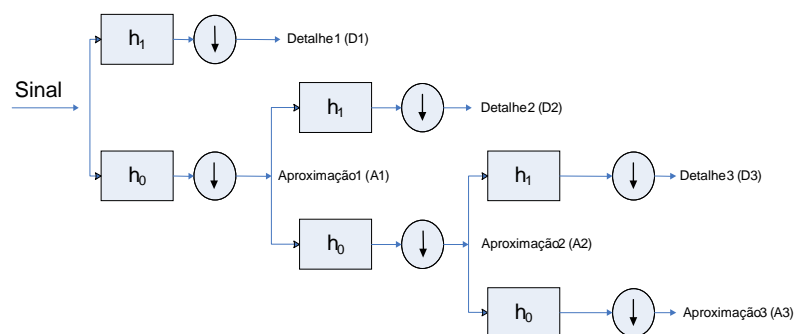
Com o intuito de se obter uma melhor visualização do processo de filtragem com a diminuição do número de amostras do sinal, é mostrado na Figura 26, um exemplo do desenvolvimento da TWD de um sinal. Neste caso, o sinal é uma senóide pura com ruído de alta frequência. Pode-se observar que o coeficiente de detalhe (D) consiste, principalmente, do ruído de alta frequência, enquanto que o coeficiente de aproximação (A) contém muito menos ruído que o sinal original.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O algoritmo de decomposição de um sinal em análise multirresolução é ilustrado na Figura 27, o qual apresenta três níveis de decomposição. Os detalhes e aproximações do sinal original são obtidos por meio de bancos de filtros passa-baixa (h_0) e passa-alta (h_1). Um filtro passa-baixa remove as componentes de altas frequências, enquanto o filtro passa-alta separa o conteúdo de alta frequência do sinal em análise (KIM; AGGARWAL, 2000).

Figura 27 - Processo de decomposição de um sinal em AMR.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Resumindo, a ideia básica da AMR, também conhecida como decomposição em múltiplos níveis, é dividir o espectro de um sinal em sub-bandas e então tratar individualmente cada uma dessas sub-bandas, considerando o propósito desejado.

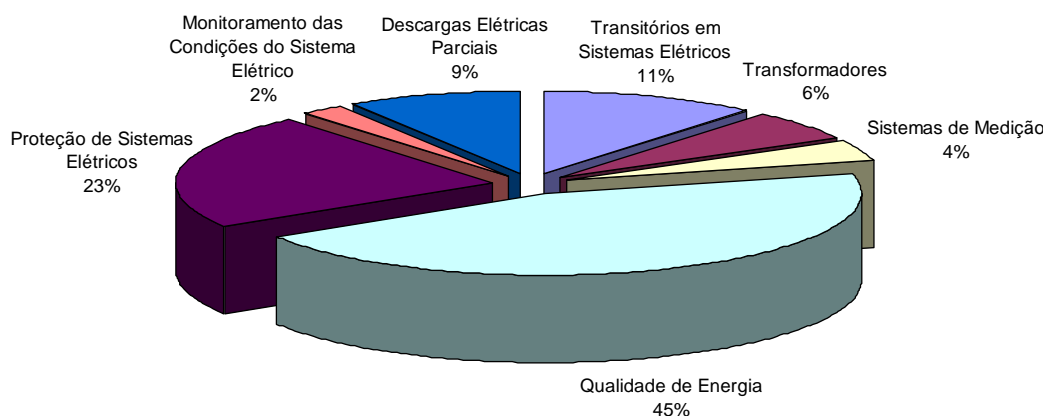
A fim de se conseguir uma representação não redundante e reconstrução perfeita do sinal original, são requeridos bancos de filtros ortogonais e, conseqüentemente, uso de wavelets ortogonais. O número máximo de níveis de decomposição wavelet é determinado pelo comprimento do sinal, pela wavelet mãe selecionada e, pelo nível de detalhe exigido. Na prática, seleciona-se um número satisfatório de níveis baseado na natureza do sinal. (KIM; AGGARWAL, 2001)

As famílias wavelets frequentemente mais usadas para processamento de sinais são as wavelets Daubechies (db), Morlets, Coiflets (coif) e Symlets (sym). Estas wavelets exibem diferentes atributos e critérios de desempenho quando utilizadas em aplicações específicas, tais como: detecção de transitórios, compressão de sinais e filtragem de ruído. Apesar de não existir um critério definido para a escolha das wavelets, a melhor escolha é uma wavelet, que melhor caracteriza o fenômeno ou o problema a ser estudado.

3.2.6 Aplicações da TW em Sistemas Elétricos de Potência

Nas últimas décadas, houve um maior número de publicações sobre a aplicação da Transformada Wavelet em sistemas elétricos de potência (SEP). Diversas técnicas de processamento digital de sinais e inteligência computacional têm sido aplicadas na análise da qualidade da energia e diferentes propostas de aplicações vêm sendo introduzidas, destacando-se neste contexto o emprego da TW na: detecção, classificação e localização de faltas. A TW pode ser facilmente implementada através do uso de uma linguagem de programação, como por exemplo C, C++, Java, ou através da utilização de pacotes computacionais já existentes, como é o caso do “Toolbox” incluso no software Matlab ®. A Figura 28 ilustra as áreas de aplicação da TW em SEP.

Figura 28 - Áreas de aplicação da TW em SEP.



Fonte: Kim e Aggarwal (2001).

He e Starzyk (2006) propõem uma técnica para a classificação dos distúrbios de qualidade de energia baseada na TW e em sistemas SOLAR (“Self Organizing Learning System”). A TW é utilizada para extrair os vetores de parâmetros dos distúrbios, que são aplicados ao sistema SOLAR para treinamento e teste. Segundo os autores o sistema SOLAR tem três vantagens sobre as redes neurais típicas, sendo elas: uma aprendizagem dirigida, interconexões locais e alta capacidade de auto-organização.

O desempenho da TW em detectar distúrbios na presença de ruídos é altamente prejudicado devido à sua dificuldade de separar essas informações. Yang e Liao (2001) propõem uma técnica para detecção de distúrbios em ambientes ruidosos em que um limiar de eliminação dos ruídos é determinado adaptativamente, de acordo com o nível de ruído de fundo presente no sistema.

3.3 Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais (RNAs) são modelos computacionais desenvolvidos com base no sistema nervoso e no próprio cérebro dos seres humanos, possuindo, desta maneira, alta capacidade de aquisição e manutenção do conhecimento adquirido ao longo do tempo. Os elementos computacionais denominados de “neurônios artificiais” são modelos simplificados dos neurônios biológicos. Tais modelos foram inspirados a partir da análise da geração e propagação de impulsos elétricos pela membrana celular dos neurônios biológicos.

Estima-se que a rede neural biológica do ser humano seja constituída de cerca de 100 bilhões de neurônios (10^{11}), sendo cada um destes interligados por conexões sinápticas em média a outros 6 mil neurônios, perfazendo um total de 600 trilhões de sinapses (SHEPHERD, 1990). Silva, Spatti e Flauzino (2010) apresentam um bom resumo histórico sobre as publicações relacionadas à neurocomputação e uma descrição mais detalhada sobre diversos fatores históricos envolvidos no percurso evolutivo das redes neurais artificiais pode ser encontrada em (HAYKIN, 1999).

As principais características relacionadas às redes neurais artificiais são:

- i) Adaptação por aprendizado – as adaptações dos pesos sinápticos (parâmetros internos das redes) são ajustadas a partir da apresentação sucessiva de padrões/amostras relacionadas ao comportamento do processo a ser mapeado, possibilitando a aquisição de conhecimento por experiência;

- ii) Capacidade de aprendizado – através da aplicação de um método de treinamento supervisionado (ou não), as redes neurais conseguem extrair as correlações existentes entre as diversas variáveis observadas do sistema e que representam as entradas de dados dessas redes neurais;
- iii) Aprendizado continuado – algumas redes são capazes de aprender novos padrões sem que ocorra a perda do conhecimento previamente adquirido ou haja a necessidade de passar por um retreinamento completo;
- iv) Habilidade de generalizar – após o término do processo de treinamento da rede, esta se torna capaz de generalizar o conhecimento adquirido, possibilitando estimar soluções até então desconhecidas, com elevado índice de acerto;
- v) Organização de dados – as RNAs são capazes de se auto-organizar, visando o agrupamento de padrões que apresentem particularidades em comum, baseados em características intrínsecas de determinado conjunto de informações referentes a um processo ou sistema a ser mapeado;
- vi) Tolerância às falhas – as RNAs são consideradas sistemas tolerantes às falhas porque, mesmo quando parte de sua estrutura interna é corrompida, ainda é possível obter um resultado correto ou aproximado devido ao elevado número de interconexões existentes entre seus neurônios artificiais;
- vii) Armazenamento distribuído – o conhecimento a respeito do comportamento de determinado processo é armazenado de forma distribuída nos pesos sinápticos de cada neurônio artificial devido ao elevado número de interconexões existentes entre eles, permitindo, assim, um aumento da robustez da arquitetura mediante a falha de algum neurônio ou corrupção de dados.

As redes ART, baseadas na teoria da ressonância adaptativa (GROSSBERG, 1976a; 1976b) foram desenvolvidas a partir de observações de alguns fenômenos biológicos envolvendo a visão, a fala e as interações cognitivo-emocionais humanas. As topologias baseadas nas redes ART podem ser divididas em 5 grupos principais, classificados em função do tipo de entrada e processo de treinamento, sendo eles: ART-1, com padrões de entrada binários e treinamento não supervisionado (CARPENTER; GROSSBERG, 1987a); ART-2, com padrões de entrada binários ou analógicos (contínuos) e treinamento não supervisionado

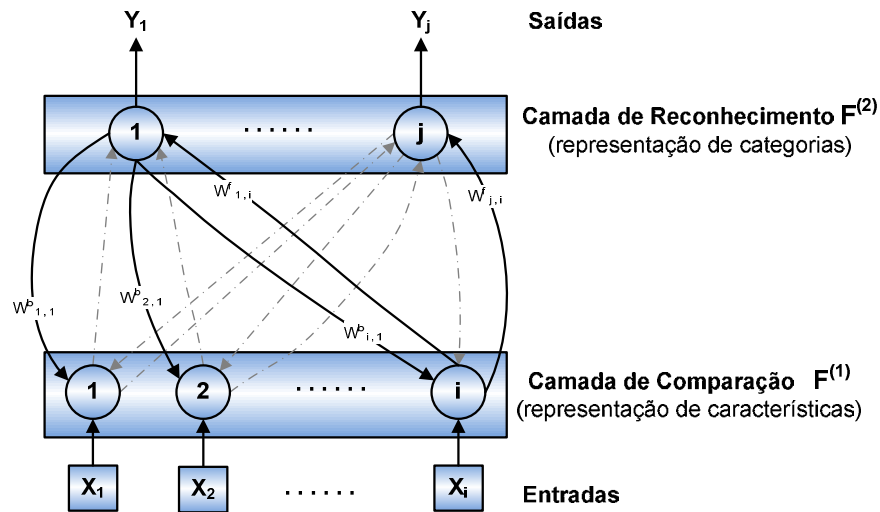
(CARPENTER; GROSSBERG, 1987b); ART-3, com padrões de entrada binários ou analógicos (contínuos), treinamento não supervisionado e topologia multinível para o controle do processo de busca da melhor solução (CARPENTER; GROSSBERG, 1990); ARTMAP, com padrões de entrada binários ou analógicos (contínuos) e treinamento supervisionado em tempo real (CARPENTER; GROSSBERG, 1991a) e, por último, a rede ARTMAP-Fuzzy, que é a versão fuzzy da ARTMAP (CARPENTER; GROSSBERG, 1991b) e que foi escolhida para o desenvolvimento deste trabalho.

3.3.1 Rede Neural ARTMAP-Fuzzy

A rede neural ARTMAP-Fuzzy (CARPENTER et al., 1991b, 1992) possui treinamento supervisionado, que consiste na utilização de pares de padrões de entrada e saída, ou seja, a rede é treinada através da combinação dos respectivos padrões de entrada e saída que representam o comportamento real do sistema. Este tipo de treinamento utiliza um agente externo (tutor) na fase de aprendizado, que avalia e informa a rede sobre seu desempenho. Ao apresentar um padrão de entrada durante a fase de aprendizagem, a rede verifica se a saída obtida corresponde à saída desejada. Caso isto não ocorra, a rede deverá ajustar os pesos sinápticos de seus neurônios de maneira que possa armazenar o novo conhecimento adquirido e apresentar como resultado final o valor correspondente ao padrão de saída desejado.

As redes neurais do tipo ARTMAP-Fuzzy são redes auto-organizáveis e que apresentam treinamento supervisionado, sendo compostas por dois módulos de rede tipo ART, denominados de ARTa e ARTb. Estes dois módulos são conectados através de um módulo de memória associativa conhecida como inter-ART ou match-tracking, cuja função é maximizar a generalização das respostas e minimizar o erro através de um processo autorregulador. A Figura 29 representa a estrutura topológica de um desses módulos de rede ART, que funcionam baseados na teoria da ressonância adaptativa (CARPENTER; GROSSBERG, 1991a).

Figura 29 – Estrutura topológica de uma rede ART-Fuzzy.



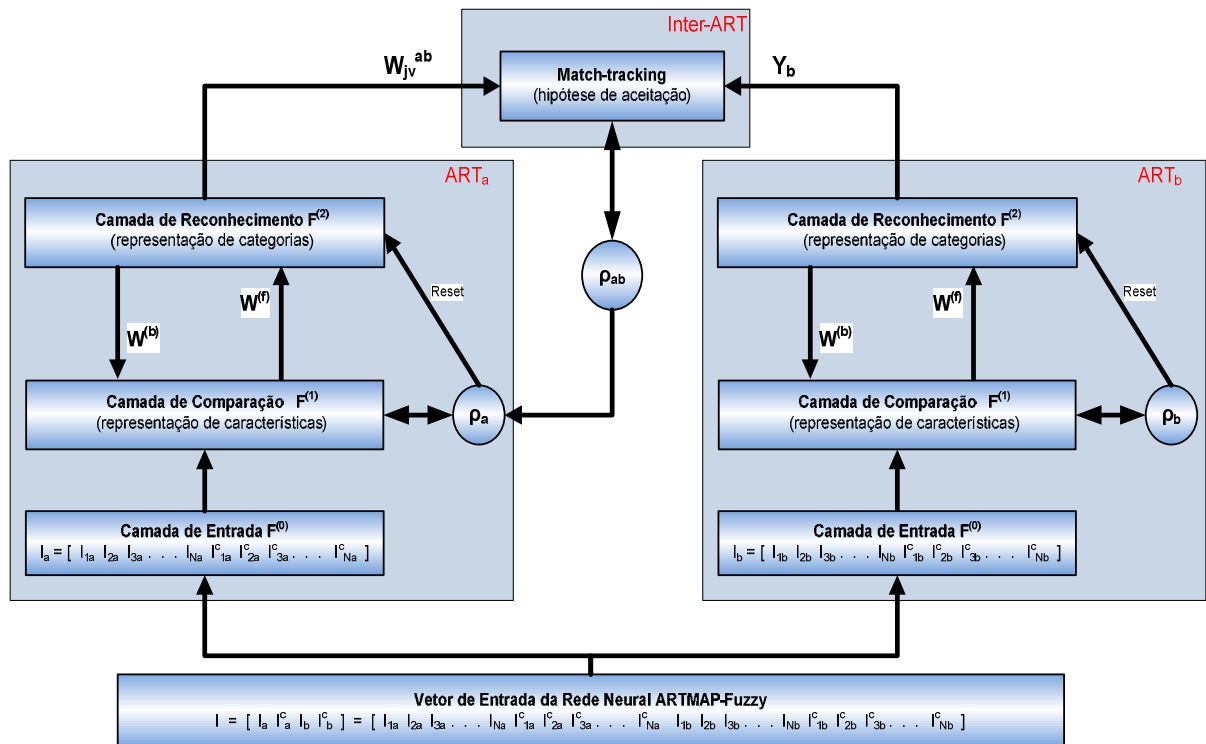
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Decanini (2012) descreve em seu trabalho os passos do algoritmo da rede neural ART-Fuzzy, abordando desde a normalização dos dados de entrada, inicialização dos pesos e parâmetros da rede e escolha das categorias ativas até a ressonância e aprendizado final.

Os processos de treinamento e aprendizagem das redes ARTMAP-Fuzzy são muito parecidos com os das redes ART-Fuzzy, sendo que a principal diferença está no fato de que a rede ARTMAP-Fuzzy possui um sistema de conexão entre os dois módulos ART, fazendo com que a rede tenha um treinamento supervisionado. Este treinamento ocorre da mesma forma que ocorre na rede ART-Fuzzy, sendo que agora existirá mais uma matriz de pesos relacionado ao campo F^{ab} .

Sempre que a rede realiza um prognóstico errado, através de uma conexão associativa instruída, o parâmetro de vigilância ρ_a do módulo ARTa é incrementado em uma quantidade mínima necessária para corrigir o erro no módulo ARTb. Este acréscimo no parâmetro de vigilância do módulo ARTa ocorre com a finalidade de excluir de vez a categoria identificada no módulo ARTa que não combinou com a categoria do ARTb. A estrutura da rede ARTMAP-Fuzzy é apresentada na Figura 30.

Figura 30 – Fluxo de informações da rede ARTMAP-Fuzzy.



Fonte: elaborado pelo próprio autor

Os passos do algoritmo de treinamento da rede ARTMAP-Fuzzy são apresentados a seguir:

i) Inicialização dos Parâmetros:

Parâmetro de Escolha $\alpha > 0$ – controla a sequencia de busca entre os neurônios da camada $F^{(2)}$, atuando na seleção das categorias vencedoras.

Parâmetro de vigilância $\rho \in [0,1]$ - verifica a combinação dos padrões de entrada e dos pesos sinápticos para que ocorra a ressonância em cada módulo ART da rede. Assim, para um valor de ρ pequeno tem-se uma alta capacidade de generalização, produzindo poucas classes. Por outro lado, se ρ for grande, a rede produzirá muitas classes, efetuando grande distinção na classificação das amostras, conduzindo a uma baixa capacidade de generalização.

Taxa de Treinamento $\beta \in [0,1]$ - controla a velocidade de adaptação da rede. Dois tipos de treinamento são possíveis, dependendo do valor de β , sendo eles:

- Treinamento rápido, com $\beta = 1$, que permite o sistema se adaptar rapidamente.

- Treinamento lento, com $0 < \beta < 1$, no qual os pesos sinápticos dos módulos ART são adaptados lentamente, levando vários ciclos (épocas) para a aprendizagem e convergência da rede.

Parâmetro de Vigilância do módulo inter-ART $\rho_{ab} \in [0,1]$ - corresponde ao critério de vigilância de rede, verificando se a categoria ativa da rede ARTa corresponde ao vetor de saída desejado apresentado na ARTb.

Todos os pesos sinápticos relacionados aos módulos ARTa, ARTb e inter-ART possuem, inicialmente, valor unitário, mostrando que não existe nenhuma categoria ativa, ou seja:

$$W_{k,i}^a = 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 2M_a \quad (55)$$

$$W_{l,j}^b = 1, \quad j = 1, 2, 3, \dots, 2M_b \quad (56)$$

$$W_{k,l}^{ab} = 1; \quad k = 1, 2, \dots, Na; \quad l = 1, 2, \dots, Nb \quad (57)$$

Sendo:

$W_{k,i}^a$: matriz de pesos sinápticos do módulo ARTa;

$W_{l,j}^b$: matriz de pesos sinápticos do módulo ARTb;

$W_{k,l}^{ab}$: matriz de pesos sinápticos do módulo inter-ART;

Na : número de neurônios ativos na camada $F^{(2)}$ do módulo ARTa;

Nb : número de neurônios ativos na camada $F^{(2)}$ do módulo ARTb;

Ma : dimensão do vetor de entrada a do módulo ARTa;

Mb : dimensão do vetor de entrada b do módulo ARTb.

ii) Padrões de Entrada:

Nas redes neurais do tipo ARTMAP-Fuzzy os dados de entrada do módulo ARTa são denotados pelo vetor \mathbf{a} , sendo $\mathbf{a} = [a_1 a_2 a_3 \dots a_{Ma}]$ um vetor Ma -dimensional e o vetor de entrada do módulo ARTb, correspondente à saída desejada da rede, é representado pelo vetor \mathbf{b} , sendo $\mathbf{b} = [b_1 b_2 b_3 \dots b_{Mb}]$ um vetor Mb -dimensional.

Essas entradas são normalizadas para se evitar a proliferação de muitas categorias na rede, sendo comumente utilizada a equação (58), para tal finalidade:

$$\bar{a} = \frac{a}{|a|} \quad (58)$$

Sendo:

\bar{a} : vetor de entrada normalizado;

$|a| = \sum_{i=1}^M a_i$: módulo do vetor a .

Posteriormente é efetuada a codificação do complemento, preservando a amplitude da informação. Esta codificação é representada pela equação (59):

$$\bar{a}_i^c = 1 - \bar{a}_i \quad (59)$$

Sendo:

\bar{a}_i^c : complemento do vetor de entrada normalizado.

Assim, a entrada codificada I_a para os campos F^0 será um vetor $2M$ -dimensional:

$$I_a = [\bar{a} \ \bar{a}^c] = [\bar{a}_1 \ \bar{a}_2 \ \bar{a}_3 \ \dots \ \bar{a}_M \ \bar{a}_1^c \ \bar{a}_2^c \ \bar{a}_3^c \ \dots \ \bar{a}_M^c] \quad (60)$$

Da mesma forma se procede para o vetor de entrada I_b do módulo ARTb, obtendo-se:

$$I_b = [\bar{b} \ \bar{b}^c] = [\bar{b}_1 \ \bar{b}_2 \ \bar{b}_3 \ \dots \ \bar{b}_M \ \bar{b}_1^c \ \bar{b}_2^c \ \bar{b}_3^c \ \dots \ \bar{b}_M^c] \quad (61)$$

Os pares de padrões de entrada (I_a) e saída (I_b), normalizados e complementados, são introduzidos na rede neural de forma sequencial para o seu treinamento.

iii) Escolha das Categorias

Para cada entrada I e neurônio ativo na camada $F^{(2)}$, a função escolha T_j é definida por Carpenter et. al. (1992) como:

$$T_j = \frac{|I \wedge W_j|}{\alpha + |W_j|} \quad (62)$$

Sendo:

\wedge : o operador fuzzy AND definido por $(p \wedge q)_i = \min(p_i, q_i)$;

$|p| = \sum_{i=1}^M p_i$: a norma do vetor, para qualquer vetor M -dimensional p ou q .

A escolha da categoria é realizada quando pelo menos um dos neurônios da camada $F^{(2)}$ torna-se ativo. Portanto, a categoria vencedora corresponde ao neurônio ativo jv dado por:

$$jv = \max \{ T_j \} , \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (63)$$

Sendo:

N : número de neurônios ativos na camada $F^{(2)}$.

Se existir mais de um neurônio ativo, a categoria escolhida é aquela que tiver o menor índice j , ou seja, o neurônio que foi ativado primeiro, sendo assim, as saídas dos neurônios da camada $F^{(2)}$ podem ser representadas por:

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{se } j = jv \\ 0, & \text{se } j \neq jv \end{cases} \quad (64)$$

iv) **Ressonância e Reset**

A ressonância acontece se o critério de vigilância para a categoria escolhida, descrito através da equação(65) (CARPENTER et. al., 1992), for satisfeito:

$$\frac{|I \wedge W_{jv}|}{|I|} > \rho \quad (65)$$

Se a equação (65) não for satisfeita ocorre o chamado “*reset*” da categoria. No reset, o T_j do neurônio jv vencedor assume valor zero, excluindo-o do processo de busca da categoria ativa. Então, escolhe-se uma nova categoria através da equação(63) e verifica-se a ressonância. Este processo é executado até que a rede encontre uma categoria que satisfaça o critério de ressonância ou até que todos os neurônios ativos sejam analisados. Se nenhum dos N neurônios ativos satisfaz o critério de ressonância, então, ativa-se um novo neurônio na camada $F^{(2)}$ que satisfará este critério, adicionando-se, assim, uma nova categoria à rede.

v) **Match-Tracking**

Após a ressonância dos dois módulos da rede (ARTa e ARTb), nas quais identificaram-se as categorias vencedoras (neurônios jv e k_v , respectivamente), deve-se verificar se a categoria ativa do módulo ARTa corresponde ao vetor de saída desejado, apresentado como entrada do módulo ARTb. Esta verificação é feita através do módulo de reconhecimento conhecido como match-tracking, cujo critério de vigilância é definido através da equação(66):

$$\frac{|Y^b \wedge W_{jv}^{ab}|}{|Y^b|} > \rho_{ab} \quad (66)$$

Sendo:

Y^b : o vetor de saída da camada $F^{(2)}$ do módulo ARTb;

jv : neurônio vencedor na camada $F^{(2)}$ do módulo ARTa;

Se a equação (66) não for satisfeita, é necessário que se faça um pequeno incremento no parâmetro de vigilância (ρ_a) do módulo ARTa, ligeiramente maior que o valor obtido através da equação (65), suficiente para excluir a categoria ativa e selecionar outra. Este pequeno incremento é dado por:

$$\rho_a = \frac{|I_a \wedge W_{jv}^a|}{|I_a|} + \varepsilon \quad (67)$$

Este procedimento se repete até que a equação (66) seja satisfeita.

vi) **Aprendizado**

Após ocorrer a convergência da rede, verificada através do match-tracking, realiza-se a adaptação dos pesos sinápticos dos módulos ARTa e ARTb através da seguinte equação:

$$W_{jv}^{novo} = \beta(I \wedge W_{jv}^{velho}) + (1 - \beta)W_{jv}^{velho} \quad (68)$$

Sendo:

jv : categoria ativa (neurônio vencedor).

Já os pesos sinápticos do módulo inter-ART são atualizados através da equação (69):

$$W_{jv,k}^{ab} = \begin{cases} 1, & \text{se } k = kv \\ 0, & \text{se } k \neq kv, \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, N_b \quad (69)$$

Sendo:

kv : neurônio vencedor na camada $F^{(2)}$ do módulo ARTb.

A seguir serão apresentadas as propostas para o desenvolvimento dos algoritmos inteligentes para localizar faltas e monitorar a qualidade da energia elétrica, desenvolvidos neste trabalho.

4 Metodologia Proposta

Neste capítulo são apresentadas as metodologias utilizadas no desenvolvimento dos algoritmos inteligentes para localizar faltas e monitorar a qualidade da energia em sistemas de distribuição com geração distribuída, abordando desde a detecção e classificação dos distúrbios até a sua localização física na rede elétrica.

4.1 Algoritmos de Detecção e Classificação de Distúrbios

Os algoritmos para detecção e classificação de distúrbios desenvolvido neste trabalho baseiam-se na capacidade da Transformada Wavelet (TW), através da Análise Multirresolução (AMR), em extrair características particulares dos diferentes tipos de fenômenos relacionados com a qualidade da energia elétrica (QEE). Sendo assim, a diferenciação entre as características do sinal é efetuada pela forma como, usualmente, os níveis de detalhes e aproximações obtidos pela AMR comportam-se na decomposição de um dado distúrbio. Em função de suas diferenças, desenvolveu-se um método eficiente para detectar e classificar os distúrbios, utilizando-se os quatro primeiros níveis de detalhes e aproximações da decomposição por AMR, visto que a taxa de amostragem do sinal utilizada neste projeto foi de 3,84 kHz, ou seja, 64 amostras por ciclo, a uma frequência nominal do sistema de 60 Hz.

Este algoritmo foi dividido em 4 módulos distintos, sendo eles:

Módulo 1: Responsável pela detecção do distúrbio, neste módulo realiza-se a aquisição das oscilografias das tensões e correntes trifásicas na saída do alimentador e avalia-se o estado operativo do sistema através de análises estatísticas dos coeficientes de detalhes dos sinais de corrente;

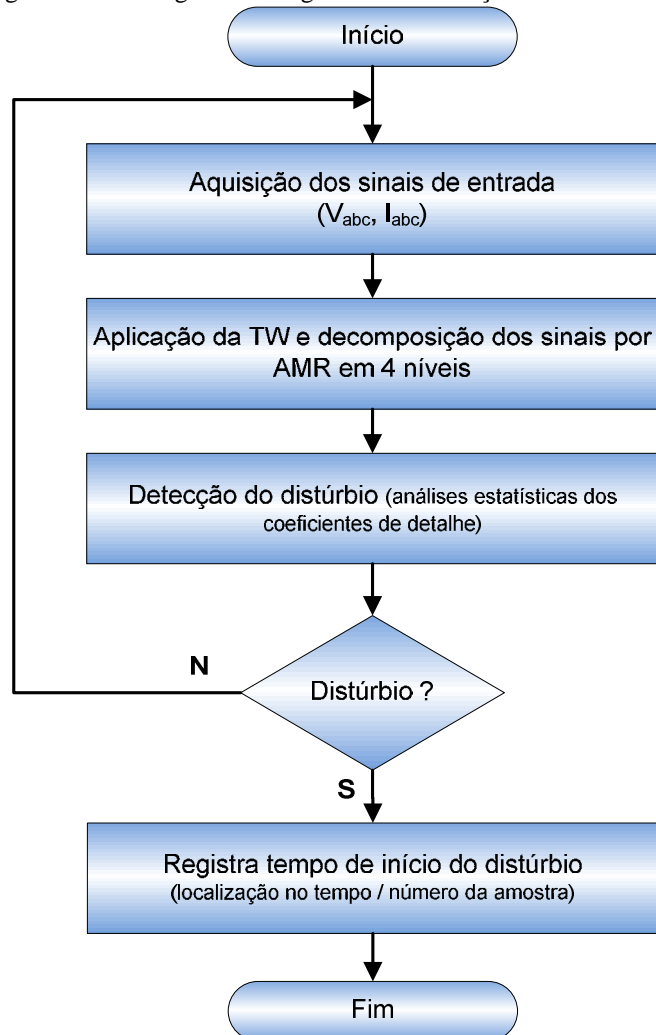
Módulo 2: Neste módulo, extraem-se as características dos sinais de corrente e tensão, considerando o comportamento pré-falta (E_{ij}^p) e pós-falta (E_{ij}^d) do sistema, através do cálculo da energia desses sinais. Calcula-se a razão X_{ij} e a diferença N_{ij} entre esses índices pré e pós-falta, normalizando-os em relação ao seu valor máximo para cada nível de detalhe j e, em seguida, calculam-se os índices característicos Y_{ij} das tensões e correntes do sistema e os índices wavelets W_{ij} das tensões;

Módulo 3: É responsável pela identificação dos eventos de qualidade de energia presentes nas oscilografias das tensões. Os índices wavelets das tensões são transladados para o domínio [0,1], a fim de comporem os vetores de entrada das 12 redes neurais artificiais ARTMAP-Fuzzy treinadas e utilizadas neste módulo;

Módulo 4: É responsável pela identificação do tipo de curto-circuito registrado nas oscilografias das correntes. Os índices característicos do estado operativo da rede são também transladados para o domínio [0,1] a fim de comporem os vetores de entrada das 3 RNAs treinadas e utilizadas na classificação de curtos-circuitos;

Esses quatro módulos são detalhados a seguir, sendo que a Figura 31 representa o fluxograma do algoritmo de detecção de distúrbios (módulo 1) desenvolvido neste trabalho.

Figura 31 – Fluxograma do algoritmo de detecção de distúrbios.



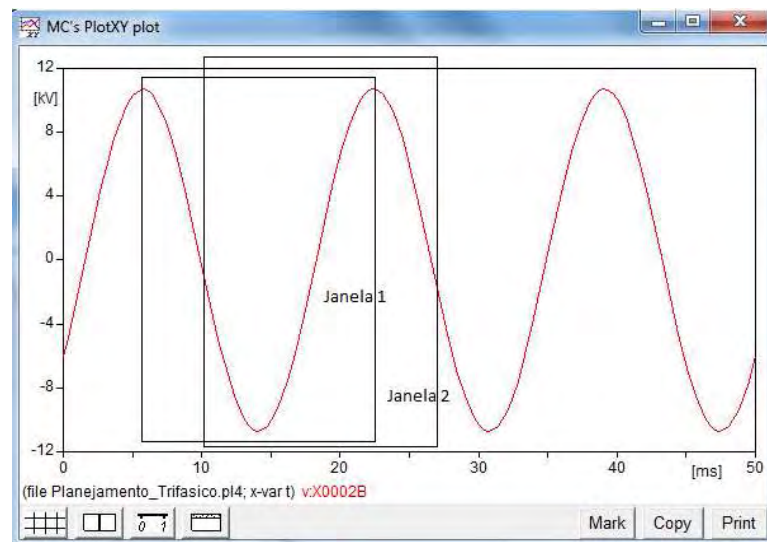
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.1.1 Módulo 1: Detecção do Distúrbio e Localização no Tempo

O módulo de detecção do distúrbio e localização no tempo foi concebido levando-se em consideração o monitoramento permanente dos sinais de corrente aquiritados de um sistema de medição presente na saída do alimentador.

Sendo assim, o módulo analisa o sinal de entrada tomando uma janela fixa de 64 amostras (um ciclo) com passo de 1/4 de ciclo, como ilustrado na Figura 32. Esta janela de dados é decomposta em AMR, utilizando a wavelet mãe db4, para que seja efetuada a análise dos quatro primeiros níveis de detalhes.

Figura 32 - Esquema de janelamento do sinal de entrada para detecção de distúrbios.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Assim, para os quatro níveis de detalhes dos sinais amostrados, algumas análises estatísticas são realizadas, nas quais são calculadas: a média aritmética $\overline{d_{ij}}$, o desvio quadrático médio da média var_{ij}^k (variância) e o desvio padrão σ_{ij} . A equação (70) representa a média aritmética dos valores absolutos dos coeficientes de detalhes da oscilografia i no nível de decomposição j .

$$\overline{d_{ij}} = \frac{\sum_{k=1}^{N_j} d_{ij}^k}{N_j} \quad (70)$$

Sendo:

- i : oscilografia de corrente em análise, i.e., correntes nas fases I_a , I_b ou I_c ;
- j : nível de decomposição;
- N_j : número de coeficientes de detalhe no nível de decomposição j ;
- d_{ij}^k : k -ésimo coeficiente de detalhe da oscilografia i no nível de decomposição j .

A equação (71) representa a variância da oscilografia i no nível de decomposição j .

$$var_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{N_j} (d_{ij}^k - \bar{d}_{ij})^2}{N_j - 1} \quad (71)$$

A equação (72) representa o desvio padrão dos valores absolutos dos coeficientes de detalhes da oscilografia i no nível de decomposição j .

$$\sigma_{ij} = \sqrt{var_{ij}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_j} (d_{ij}^k - \bar{d}_{ij})^2}{N_j - 1}} \quad (72)$$

As regras para a detecção do distúrbio foram criadas a partir da observação do comportamento dos sinais de correntes em diversas situações de operação do sistema. Assim, a detecção do distúrbio baseia-se no conjunto de regras apresentados nas equações (73) e (74). Através das análises estatísticas da variância e do desvio padrão das amostras busca-se conhecer o comportamento geral do sinal, comparando a máxima variação dos coeficientes de detalhes a um percentual do desvio padrão, proporcionando maior imunidade à presença de ruídos nas oscilografias. Já na análise do máximo valor dos coeficientes de detalhes da oscilografia i no nível de decomposição j , é feita uma análise pontual, onde se confronta o maior coeficiente de detalhe com um valor limite preestabelecido, definido com base nas características de operação de cada sistema.

- $se \max[var_{ij}] > 3\sigma_{ij} \text{ e } \max[|d_{ij}^k|] > \gamma_j \rightarrow \lambda_{ij} = 1$ (73)

(indica a existência de distúrbio na amostra)

- $se \max[var_{ij}] \leq 3\sigma_{ij} \text{ ou } \max[|d_{ij}^k|] \leq \gamma_j \rightarrow \lambda_{ij} = 0$ (74)

(indica o funcionamento normal do sistema)

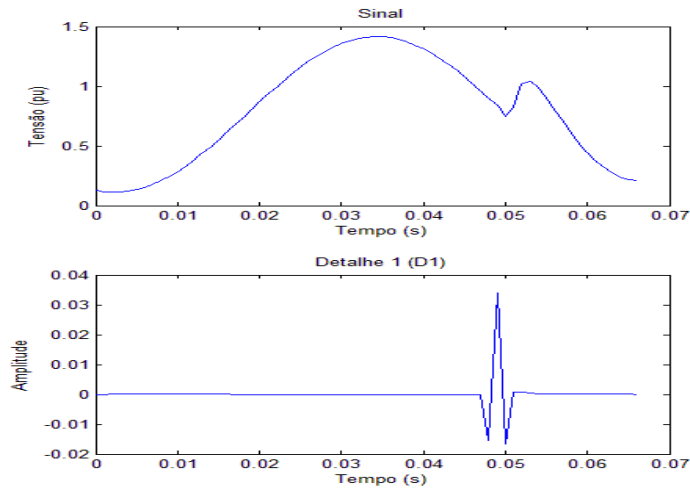
Sendo:

- γ_j : parâmetros especificados baseando-se na experiência com a operação do sistema;
- λ_{ij} : índice indicativo do estado operativo do sistema.

A Figura 33 representa as formas de onda utilizadas pelo algoritmo para a detecção através da AMR de um sinal de tensão. Parte de um sinal caracterizando um afundamento de tensão é ilustrado na Figura 33.a, e seu primeiro nível de detalhe (D_1) da decomposição por AMR é ilustrado na Figura 33.b. Pode-se verificar que, no instante em que a energia do sistema foi reduzida subitamente, o sinal decomposto acusou a presença de picos, indicando o início do distúrbio. Estes picos alteram o valor médio do sinal em regime, permitindo a

detecção do distúrbio. Detectada a anormalidade no sistema, identifica-se o instante de sua ocorrência.

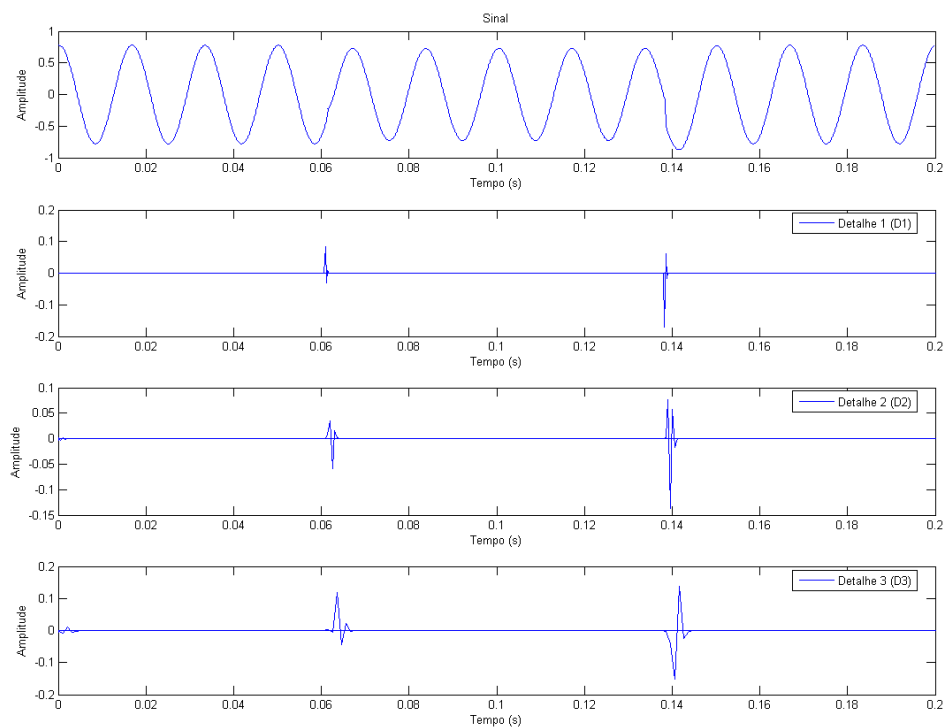
Figura 33 - Exemplo de detecção de um distúrbio.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 34 apresenta um distúrbio de afundamento de tensão, seguido do primeiro, segundo e terceiro níveis de detalhes da decomposição em AMR. Pode-se observar claramente que os detalhes D_1 , D_2 e D_3 indicam corretamente os instantes de início e fim do distúrbio, através dos picos ilustrados.

Figura 34 - Decomposição em AMR de um distúrbio de afundamento de tensão.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O algoritmo desenvolvido explora esta característica da decomposição de um distúrbio em AMR para localizá-lo temporalmente, sendo que tal localização é realizada utilizando-se a mesma janela de dados utilizada na detecção do distúrbio. O algoritmo retém o valor máximo do sinal naquela janela de dados, sendo este o valor indicativo do instante de início do distúrbio.

Os primeiros detalhes da decomposição por AMR são utilizados para estimar a duração do distúrbio. Verifica-se que as formas de ondas dos 3 primeiros níveis de detalhe são bastante similares em se tratando dos distúrbios sob estudo. Assim, através das análises realizadas no decorrer deste trabalho, o primeiro nível de detalhe (D_1) da AMR foi utilizado, apresentando bons resultados. Após a detecção do tempo de início, uma nova janela é iniciada após 64 amostras (que corresponde a um ciclo do sinal) do instante de início do distúrbio. Tal “salto” da janela é realizado para que variações em instantes inferiores ao tempo mínimo de definição dos fenômenos em estudo não sejam detectadas. Em seguida o algoritmo detecta, através de variações de D_1 , a janela de dados que contém o instante de término do distúrbio e o retém através de um processo similar ao realizado para o instante de início do distúrbio.

Uma vez detectada a presença de distúrbio na forma de onda, o algoritmo analisa o primeiro nível de aproximação (A_1) do sinal de forma a estimar a amplitude do distúrbio ocorrido. Tal versão de aproximação é utilizada por conter, por completo, a componente fundamental do sinal, tendo sido extraídas as componentes de altas frequências que poderiam apresentar estimativas errôneas. Os erros que podem ocorrer na presença de altas frequências decorrem de picos característicos, indicando uma amplitude de sinal que não condiz com a amplitude do distúrbio ocorrido. Para a estimação da amplitude do distúrbio o algoritmo retém os valores de pico da tensão, no primeiro nível de aproximação (A_1), antes do distúrbio e durante o distúrbio, uma vez que o instante de início do distúrbio foi detectado através do processo descrito anteriormente.

4.1.2 Módulo 2: Extração das Características do Sistema

A extração dos índices característicos do estado operativo do sistema e dos índices wavelets baseia-se nos seis primeiros níveis dos coeficientes de detalhes e aproximações dos sinais das tensões e correntes registrados na saída do alimentador e em pontos remotos, decompostos através da AMR. Este conjunto de informações possibilita ampla representação dos possíveis distúrbios. Tendo sido detectada alguma anomalia nos sinais de entrada, um número maior de ciclos é então armazenado, contendo os dados pré-falta e pós-falta. Estes sinais são então submetidos ao processo de extração das características conforme descrito a seguir.

a) Cálculo da Energia do Sinal.

Segundo o teorema de Parseval, citado por Oppenheim, Schafer e Buck (1998), a energia E de um sinal discreto $x[n]$ pode ser calculada tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, sendo:

$$E_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |X(e^{j\omega})|^2 d\omega = \sum_{n=1}^{N_j} |x[n]|^2 \quad (75)$$

Sendo:

- j : nível de decomposição;
- $|X(e^{j\omega})|^2$: densidade espectral de energia;
- N_j : número de amostras no nível de decomposição j ;
- $x[n]$: n -ésima amostra do coeficiente de detalhe ou aproximação.

Como os sinais com distúrbios de qualidade de energia apresentam grandes desequilíbrios, com diferentes componentes de frequências, o cálculo da energia do sinal pode ser utilizado para extrair importantes características dos diferentes tipos de distúrbios. Sendo assim, através do cálculo da energia dos sinais pré-falta e pós-falta, é possível quantificar o grau de desequilíbrio do estado operativo do sistema, sendo uma boa ferramenta para avaliar, de forma discreta, sinais não estacionários.

b) Representação dos Índices Característicos do Sistema

Após o cálculo da energia pré-falta E_{ij}^p e pós-falta E_{ij}^d dos sinais analisados, calcula-se a razão Γ_{ij} entre estas energias e, em seguida, normalizam-se estes valores em relação ao valor máximo encontrado para cada nível de decomposição j . Este cálculo é apresentado nas equações (76) e (77).

$$\Gamma_{ij} = \frac{E_{ij}^d}{E_{ij}^p} \quad (76)$$

Sendo:

- i : oscilografia em análise, i.e., I_a, I_b, I_c, V_a, V_b ou V_c ;
- j : nível de decomposição em análise;

$$X_{ij} = \frac{\Gamma_{ij}}{\Gamma_{kj}^{max}} \quad (77)$$

Sendo:

- X_{ij} : valor normalizado da razão entre as energias pré e pós-falta da oscilografia i no nível de decomposição j ;
- Γ_{kj}^{max} : valor máximo referente às análises dos sinais de tensão ou corrente para o nível de decomposição j ;
- * se $k = I$ então, $\Gamma_{kj}^{max} = \max \{ \Gamma_{I_a,j}, \Gamma_{I_b,j}, \Gamma_{I_c,j} \}$
- * se $k = V$ então, $\Gamma_{kj}^{max} = \max \{ \Gamma_{V_a,j}, \Gamma_{V_b,j}, \Gamma_{V_c,j} \}$

Para finalizar, emprega-se uma representação relativa entre as fases, proposta por Mahanty e Dutta-Gupta (2007), para a representação dos índices característicos do sistema. Esta representação é descrita pelas equações (78) e (79).

$$Y_{1j} = X_{I_a,j} - X_{I_b,j} \quad Y_{2j} = X_{I_b,j} - X_{I_c,j} \quad Y_{3j} = X_{I_c,j} - X_{I_a,j} \quad (78)$$

$$Y_{4j} = X_{V_a,j} - X_{V_b,j} \quad Y_{5j} = X_{V_b,j} - X_{V_c,j} \quad Y_{6j} = X_{V_c,j} - X_{V_a,j} \quad (79)$$

Os valores dos índices representativos, presentes nas equações acima, estão compreendidos entre -1 e +1 e referem-se às características extraídas dos sinais de corrente e tensão, respectivamente. Para serem utilizados como entrada das redes neurais ARTMAP-Fuzzy, precisam ser transladados para o domínio $\Omega = [0, +1]$. Este processo é realizado aplicando-se a equação (80).

$$Y_{nj}^T = \frac{Y_{ij}+1}{2} \quad (80)$$

Sendo:

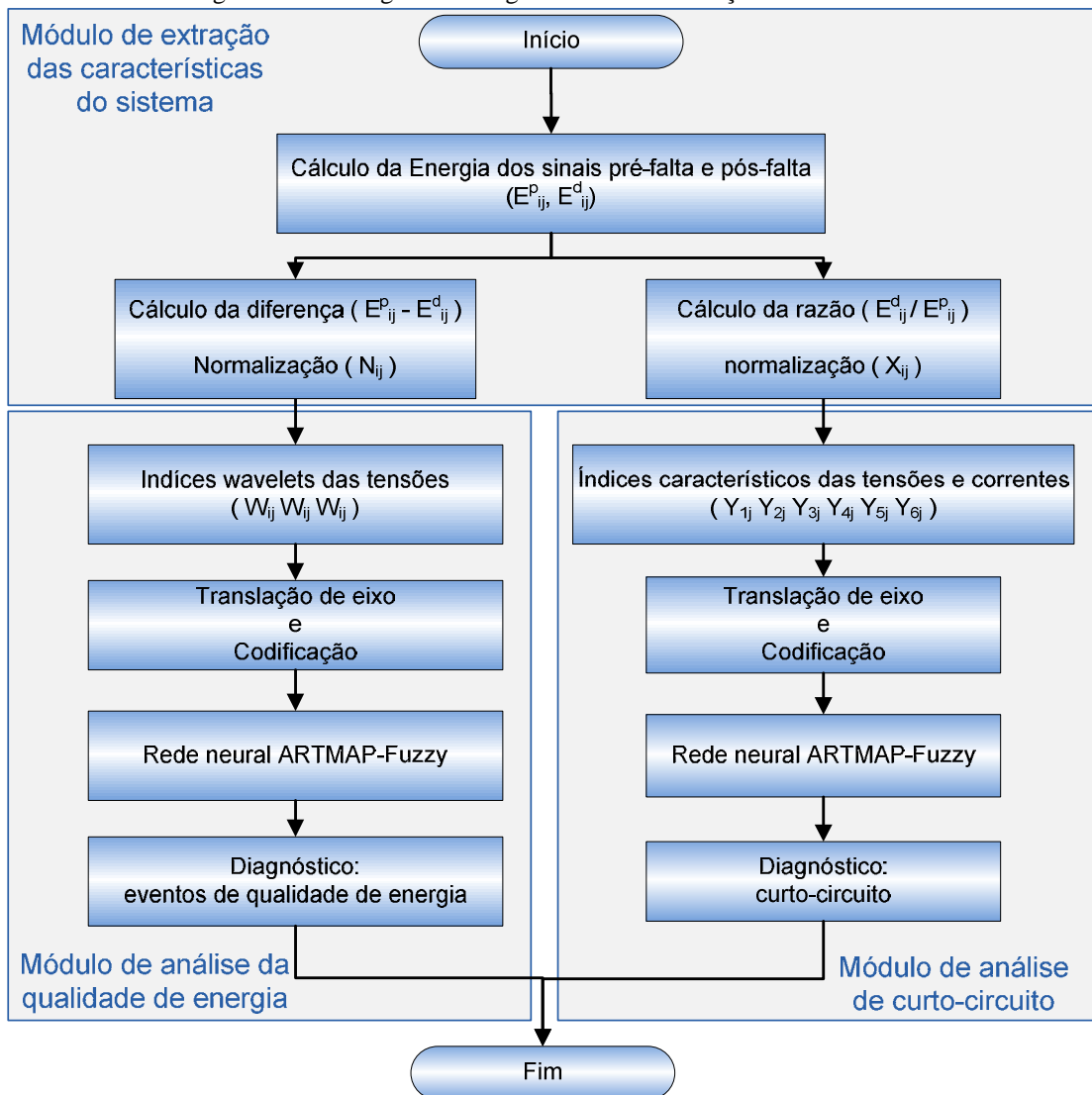
n : índice característico em análise, i.e., $n = 1, 2, \dots, 6$;

Y_{ij} : índice característico do estado operativo do sistema;

Y_{nj}^T : índice característico trasladado.

Assim, as redes neurais ARTMAP-Fuzzy, responsáveis pela classificação dos curtos-circuitos, têm como entrada vetores compostos pelos índices comportamentais Y_{nj}^T , os quais caracterizam com exatidão as fases envolvidas no distúrbio. A Figura 35 apresenta o fluxograma do algoritmo de classificação de distúrbios desenvolvido.

Figura 35 – Fluxograma do algoritmo de classificação de distúrbios.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

c) Cálculo dos Índices Wavelets das tensões

Após o cálculo da energia pré-falta E_{ij}^p e pós-falta E_{ij}^d dos sinais analisados, calcula-se a diferença Δ_{ij} entre estas energias e, em seguida, normalizam-se estes valores em relação ao valor máximo encontrado para cada nível de decomposição j . Estes cálculos são apresentados nas equações (81) e (82), respectivamente.

$$\Delta_{ij} = E_{ij}^p - E_{ij}^d \quad (81)$$

Sendo:

- i : oscilografia em análise, i.e., V_a , V_b ou V_c ;
- j : nível de decomposição em análise;

$$N_{ij} = \frac{\Delta_{ij}}{\Delta_{Vx,j}^{max}} \quad (82)$$

Sendo:

- N_{ij} : valor normalizado da diferença entre as energias pré-falta e pós-falta da oscilografia i no nível de decomposição j ;
- $\Delta_{Vx,j}^{max}$: valor máximo referente às análises dos sinais de tensão para o nível de decomposição j , ou seja, $\Gamma_{Vx,j}^{max} = \max \{ \Delta_{V_a,j}, \Delta_{V_b,j}, \Delta_{V_c,j} \}$

Após a normalização dos sinais os mesmos ficam compreendidos entre -1 e +1. Para serem utilizados como entradas das redes neurais ARTMAP-Fuzzy, precisam ser transladados para o domínio $\Omega = [0, +1]$. Este processo é realizado aplicando-se a equação (83).

$$W_{ij} = \frac{N_{ij} + 1}{2} \quad (83)$$

Sendo:

- i : oscilografia em análise, i.e., V_a , V_b ou V_c ;
- W_{ij} : índice característico do estado operativo do sistema;

Assim, as redes neurais ARTMAP-Fuzzy, responsáveis pela classificação dos eventos de qualidade de energia, têm como entrada vetores compostos pelos índices wavelets W_{ij} , os quais caracterizam de forma satisfatória os eventos de qualidade de energia.

4.1.3 Módulo 3: Análise da Qualidade de Energia

O módulo de análise da qualidade de energia é responsável pela avaliação e classificação dos eventos registrados nas formas de onda das tensões, tendo como vetores de entrada os índices wavelets calculados na subseção anterior, ou seja, $W_{V_{aj}}$, $W_{V_{bj}}$ e $W_{V_{cj}}$. A Tabela 7 apresenta a codificação das saídas esperadas das redes neurais ARTMAP-Fuzzy para os possíveis distúrbios de tensão considerados neste trabalho.

Tabela 7 - Codificação dos diferentes tipos de eventos de qualidade de energia.

Evento de Qualidade de Energia	Código	Codificação da saída (I_b)				
Operação Normal	N	0	0	0	0	0
Elevação de tensão (Swell)	E	0	0	0	0	1
Afundamento de tensão (Sag)	A	0	0	1	0	0
Interrupção de energia (Outage)	I	0	0	1	1	1
Distorção Harmônica	H	0	1	0	0	0
Elevação com Harmônicos	E+H	0	1	0	0	1
Afundamento com Harmônicos	A+H	0	1	1	1	0
Transitório Oscilatório	T	0	1	1	1	1
Elevação com Transitórios	E+T	1	0	0	0	0
Afundamento com Transitórios	A+T	1	0	0	0	1
Flickers	F	1	0	1	1	0
Elevação com Flickers	E+F	1	0	1	1	1
Afundamento com Flickers	A+F	1	1	0	0	0
Spikes	S	1	1	0	0	1
Elevação com Spikes	E+S	1	1	1	1	0
Afundamento com spikes	A+S	1	1	1	1	1

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Para compor o vetor de entrada \vec{I}_a das RNAs desenvolvidas neste módulo, foram utilizados como dados de entrada os seis níveis de detalhes e o primeiro e quinto níveis de aproximações dos índices wavelets calculados na subseção anterior. Sendo assim, o vetor de entrada \vec{I}_a das redes neurais tem dimensão 16, sendo compostos por esses seis níveis de detalhes e dois níveis de aproximações dos índices wavelets, acrescidos de seu complemento, conforme equação (84).

$$\overrightarrow{I_a} = [I_a \ I_a^c] \quad (84)$$

Sendo:

$$I_a = [W_{V_a d_1} \ W_{V_a d_2} \ W_{V_a d_3} \ W_{V_a d_4} \ W_{V_a d_5} \ W_{V_a d_6} \ W_{V_a a_1} \ W_{V_a a_6}]$$

I_a^c : complemento de I_a .

Da mesma forma o vetor de saída $\overrightarrow{I_b}$, utilizado na fase de treinamento das RNAs ARTMAP-Fuzzy, também é codificado conforme Tabela 7, e acrescido de seu complemento I_b^c . Assim, por exemplo, para um caso simulado de interrupção de energia (*outage*) tem-se a seguinte codificação:

$$\overrightarrow{I_a} = [I_a \ I_a^c] = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (85)$$

Essa codificação, tanto do vetor de entrada quanto do vetor saída, é utilizada para as três oscilografias de tensões registradas, ou seja, para as três fases do sistema V_a , V_b e V_c .

4.1.4 Módulo 4: Análise de Curto-Circuito

O diagnóstico do tipo de curto-circuito é efetuado logo após a detecção e identificação do tempo inicial do distúrbio, juntamente com a análise da qualidade de energia. Este fato é possível devido à forma modular com que o algoritmo de detecção e classificação de distúrbios foi desenvolvido e do fato que os módulos de análise de qualidade de energia e análise de curto-circuito são independentes, ou seja, compostos por redes neurais distintas, treinadas independentemente. Sendo assim, foram criadas e treinadas 3 redes neurais artificiais com diferentes tipos de padrões de entradas.

A primeira RNA projetada tem como entrada um vetor $\overrightarrow{I_a}$ de dimensão 30, composto pelos três índices característicos do sistema dos quatro níveis de detalhes e pelo quarto nível de aproximação mais o seu complemento, conforme equação (86), referente às oscilografias das correntes registradas na subestação.

$$\overrightarrow{I_a} = [I_a \ I_a^c] \quad (86)$$

Sendo:

$$I_a = [Y_{1d_1}^T \ Y_{1d_2}^T \ Y_{1d_3}^T \ Y_{1d_4}^T \ Y_{1a_4}^T \ Y_{2d_1}^T \ Y_{2d_2}^T \ Y_{2d_3}^T \ Y_{2d_4}^T \ Y_{2a_4}^T \ Y_{3d_1}^T \ Y_{3d_2}^T \ Y_{3d_3}^T \ Y_{3d_4}^T \ Y_{3a_4}^T]$$

I_a^c : complemento de I_a .

A segunda RNA projetada tem como entrada um vetor \vec{I}_a também de dimensão 30, composto pelos três índices característicos do sistema referente às oscilografias das tensões registradas na subestação, sendo formado pelos quatro níveis de detalhe e pelo quarto nível de aproximação mais o seu complemento, conforme equação (87).

$$\vec{I}_a = [I_a \ I_a^c] \quad (87)$$

Sendo:

$$I_a = [Y_{4d_1}^T \ Y_{4d_2}^T \ Y_{4d_3}^T \ Y_{4d_4}^T \ Y_{4a_4}^T \ Y_{5d_1}^T \ Y_{5d_2}^T \ Y_{5d_3}^T \ Y_{5d_4}^T \ Y_{5a_4}^T \ Y_{6d_1}^T \ Y_{6d_2}^T \ Y_{6d_3}^T \ Y_{6d_4}^T \ Y_{6a_4}^T]$$

I_a^c : complemento de I_a .

A terceira RNA projetada e treinada tem como entrada um vetor \vec{I}_a de dimensão 60, composto pelos seis índices característicos do sistema, referente às oscilografias das correntes e das tensões registradas na subestação,

A Tabela 8 apresenta a codificação das saídas esperadas da rede neural ARTMAP-Fuzzy treinada para os possíveis distúrbios de corrente analisados.

Tabela 8 - Codificação dos diferentes tipos de curto-circuito.

Fases envolvidas no curto-circuito	Codificação da saída (I_b)			
A	0	0	0	1
B	0	0	1	0
C	0	0	1	1
AB	0	1	0	0
ABT	0	1	0	1
BC	0	1	1	0
BCT	0	1	1	1
CA	1	0	0	0
CAT	1	0	0	1
ABC	1	0	1	0
ABCT	1	0	1	1

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Da mesma forma, o vetor de saída \vec{I}_b utilizado na fase de treinamento das RNAs ARTMAP-Fuzzy também é codificado conforme Tabela 8, acrescido de seu complemento I_b^c . Assim, por exemplo, para um caso simulado de curto-circuito entre as fases B e C, com a presença de Terra (T), tem-se a seguinte codificação:

$$\vec{I}_a = [I_a \ I_a^c] = [0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (88)$$

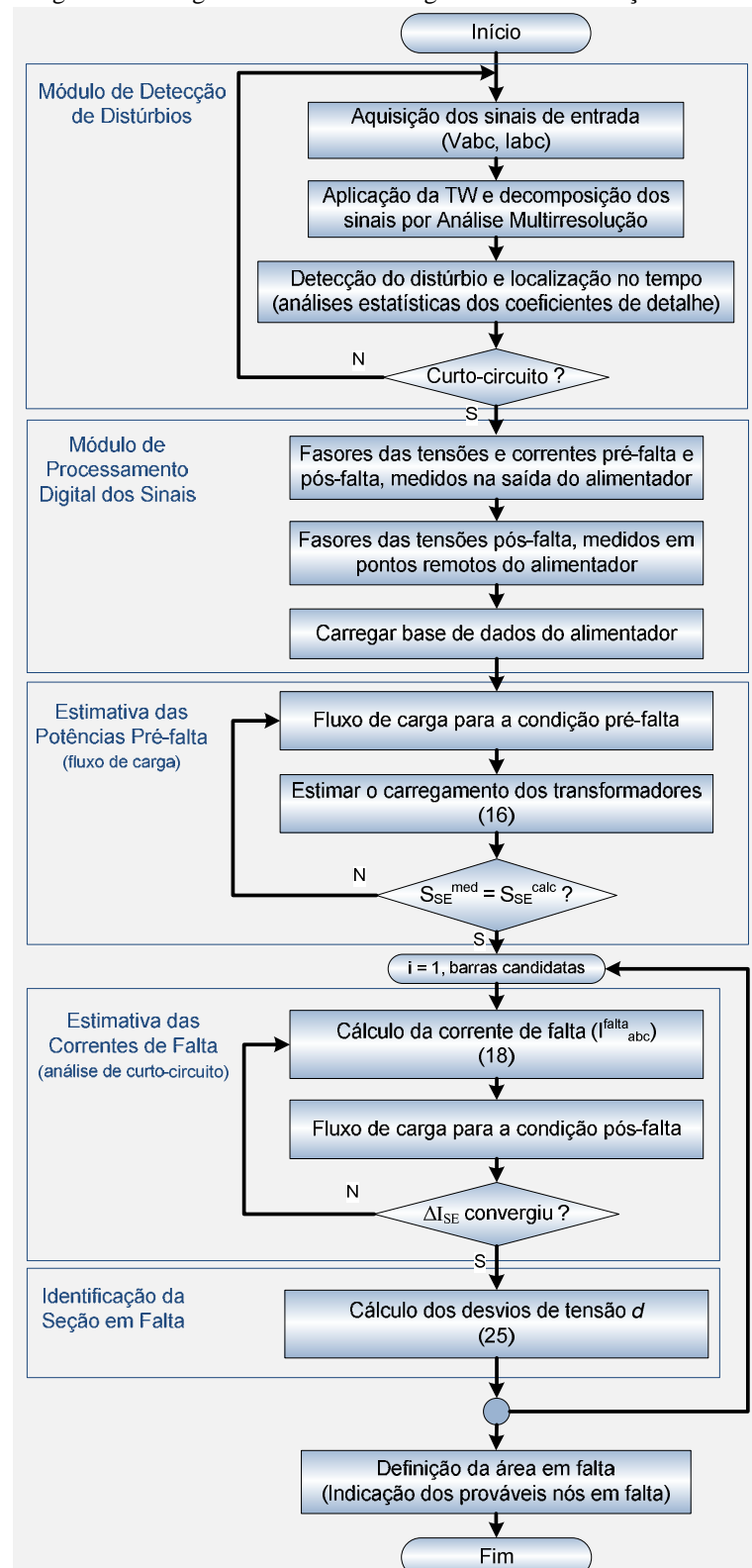
Após a execução do algoritmo de detecção e classificação de distúrbios, o qual fornece uma análise geral sobre o estado operativo da rede, inicia-se o processo de localização geográfica da falta, através do algoritmo de localização de faltas descrito a seguir.

4.2 Algoritmo de Localização de Faltas

Um bom algoritmo para localização de faltas para sistemas de distribuição de energia elétrica deve levar em consideração as características topológicas e operacionais desses sistemas, empregando técnicas apropriadas de análise de circuitos elétricos. A maioria das redes aéreas de distribuição apresenta topologia radial, várias seções, ramais laterais trifásicos, bifásicos ou monofásicos, cargas de vários tipos, relação X/R baixa e ausência de transposição. Tendo isto em vista, o algoritmo de localização de faltas desenvolvido neste trabalho teve como base o algoritmo de fluxo de potência do tipo varredura (*backward/forward sweep*) desenvolvido por Cheng e Shirmohammadi (1995), o qual é adequado e eficiente para ser aplicado em redes de distribuição radiais ou fracamente malhadas, até mesmo com a presença de geração distribuída. O princípio básico do algoritmo de localização de faltas desenvolvido é que, na presença de faltas, afundamentos de tensões propagam-se pela rede apresentando características diferentes para cada ponto do alimentador, em função da localização da falta. Essa característica possibilita que o algoritmo utilize medições esparsas de tensões, medidas ao longo do alimentador, e medições na saída do alimentador, para estimar e fornecer o local da falta com boa precisão. Sendo assim, o algoritmo desenvolvido segue o mesmo princípio do algoritmo proposto por Pereira (2009c), no qual a metodologia para localização das faltas consiste na aquisição e monitoramento de dados na saída do alimentador e em um conjunto mínimo de pontos, alocados ao longo do alimentador, para se calcular os desvios de tensões.

Juntamente com os dados das medições o algoritmo necessita de uma base de dados contendo as informações topológicas da rede, ou seja, impedâncias das seções das linhas e a potência nominal dos transformadores de distribuição. O diagrama de blocos do algoritmo de localização de faltas implementado neste trabalho está ilustrado na Figura 36.

Figura 36 - Diagrama de blocos do algoritmo de localização de faltas.



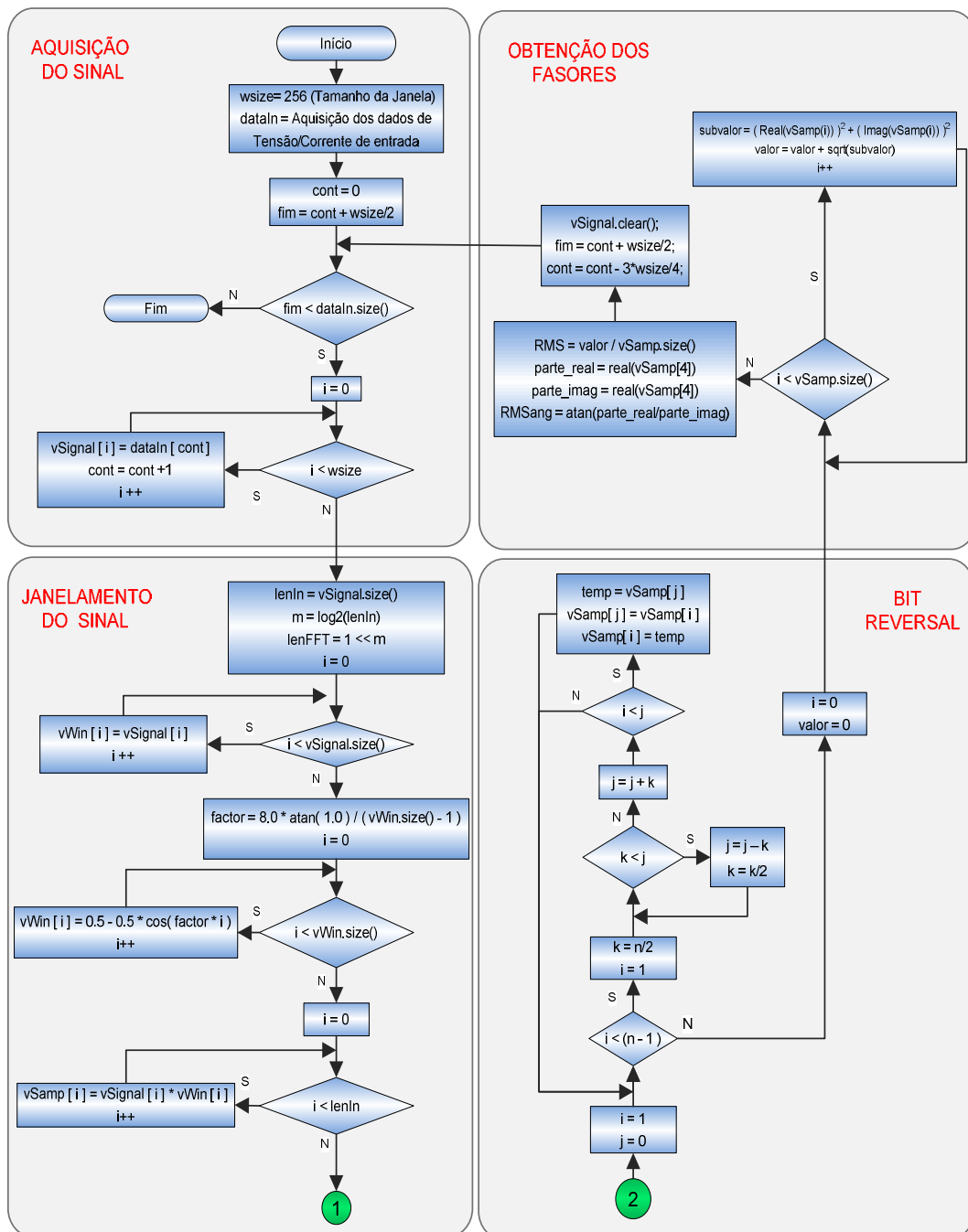
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A seguir são detalhados os principais aspectos do algoritmo de localização de faltas desenvolvido neste trabalho.

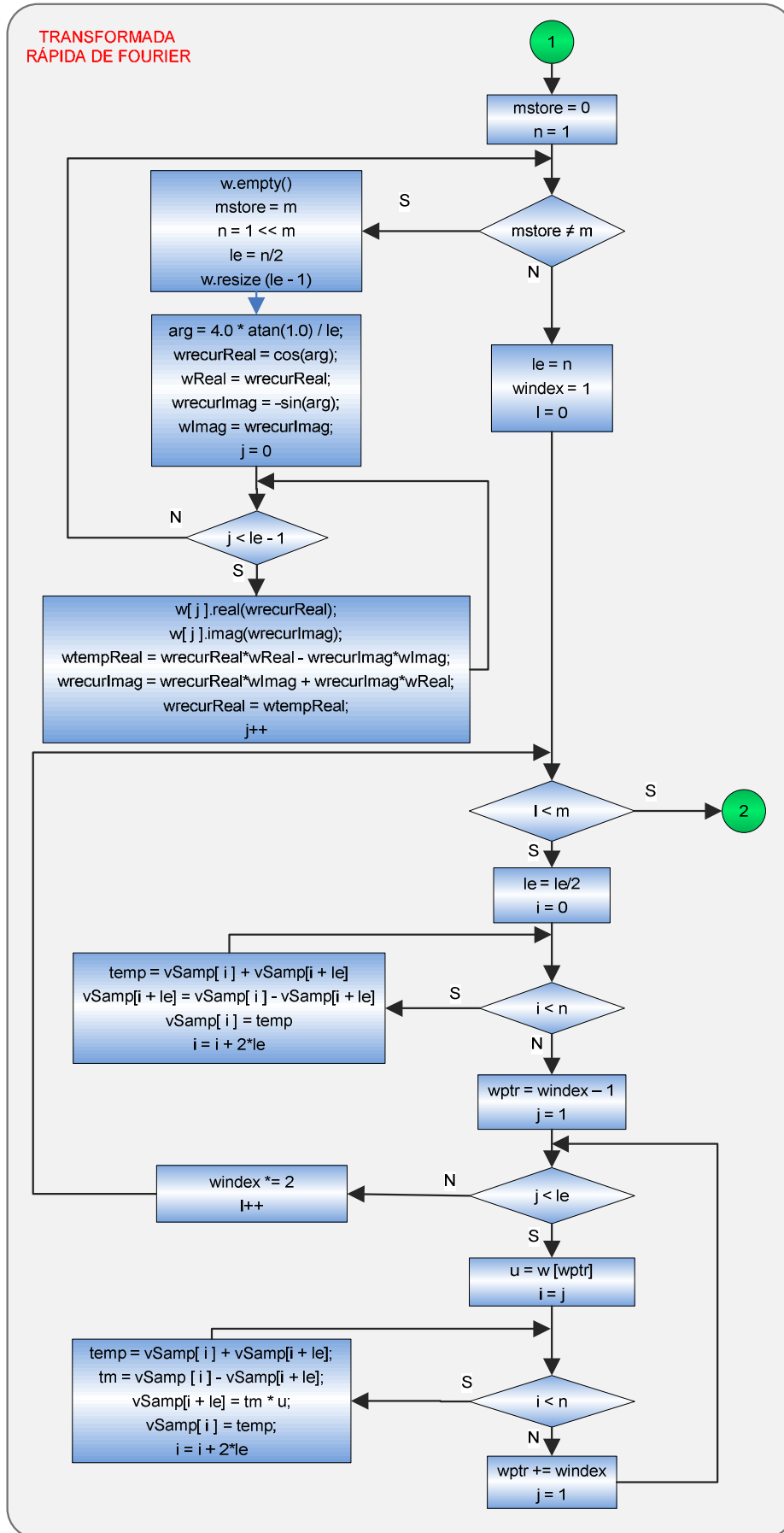
4.2.1 Aquisição e Processamento Digital dos Sinais

O processamento digital dos sinais das correntes e tensões, medidos na subestação e em pontos remotos do alimentador, é realizado através da Transformada Rápida de Fourier – FFT - a fim de se obterem os fasores das tensões e correntes pré-falta e pós-falta, necessários para a execução do algoritmo de localização de faltas. Na Figura 37 apresenta-se o diagrama de blocos completo do algoritmo para o cálculo da FFT e obtenção dos fasores tensões e correntes desenvolvidos neste trabalho.

Figura 37 – Diagrama de blocos completo do algoritmo para o cálculo da FFT.



Continua...



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Sendo:

dataIn	: dados de entrada de tensão/corrente;
wsizer	: tamanho da janela;
vSignal	: parte do sinal de entrada (dataIn) do tamanho da janela (wsizer);
w	: vetor complexo dos coeficientes $W_N^{kn} = e^{-j2\pi kn/N}$ das borboletas;
cont	: contador de posições;
fim	: contador de fim de arquivo;
n	: número de pontos da FFT;
m	: logaritmo de base 2 de n;
wptr	: apontador para o valor corrente do vetor W;
le	: diferença entre o maior e menor índice de W;
windex	: incremento de wptr (muda em cada passo).

As medições das tensões e correntes pré-falta e pós-falta na saída do alimentador devem ser executadas por equipamentos capazes de realizar a amostragem e armazenamento desses sinais. Os dados de entrada do algoritmo de localização de faltas são dados fasoriais, obtidos através da aplicação da transformada rápida de Fourier (EMBREE, 1999) nestes sinais amostrados, utilizando técnicas de janelamento de, no mínimo, um ciclo. A amostragem dos sinais de corrente também é utilizada para a identificação do tipo de falta que, através de uma rede neural ARTMAP-Fuzzy, identifica o tipo e as fases envolvidas na falta.

As medições das tensões pré-falta e pós-falta em pontos remotos do alimentador devem ser feitas por medidores dedicados instalados no alimentador. Canais de comunicações devem estar disponíveis para a transmissão dos dados medidos dos pontos remotos para o local de processamento do algoritmo de localização de faltas. Com o advento das *Smart Grids* cada vez mais equipamentos capazes de realizar estas medições existirão, como é o caso das Unidades de Terminal Remoto – UTRs.

4.2.2 Estimativa da Potência Pré-falta na Saída do Alimentador

A potência pré-falta na saída do alimentador é calculada utilizando-se os fasores das tensões e correntes trifásicas. Estes fasores são utilizados para calcular a potência aparente pré-falta fornecida pelo alimentador, que é usada para estimar o carregamento dos transformadores de distribuição no instante anterior à incidência da falta. Caso as perdas no alimentador sejam significativas, elas dificultam os cálculos das correntes pré-faltas devido ao fato da potência, estimada com base nos fasores tensões e correntes trifásicas medidas na SE, conter tais perdas. Sendo assim, a potência estimada é maior do que a potência total das

cargas instaladas no alimentador e os erros nesses cálculos ocasionam erros no processo de localização da falta. Este problema é parcialmente contornado através da metodologia detalhada a seguir, na qual se atribui a cada transformador da rede uma parcela desta perda, proporcional à sua capacidade.

4.2.3 Estimativa das Potências Pré-falta dos Transformadores de Distribuição

O carregamento de cada transformador de distribuição é estimado com base na sua potência nominal, assim, a potência complexa pré-falta de cada transformador pode ser calculada conforme a equação (89):

$$S_i = \rho_i \cdot S_i^{nom} \cdot \frac{S_{SE}}{\sum_{k=1}^{nt} \rho_k \cdot S_k^{nom}} \cdot [\cos(\varphi_{SE}) + j \operatorname{sen}(\varphi_{SE})] \quad (89)$$

Sendo:

- S_i^{nom} : potência nominal do i-ésimo transformador;
- S_{SE} : potência aparente estimada para a subestação;
- $\cos(\varphi_{SE})$: fator de potência estimado para a subestação;
- nt : número total de transformadores instalados no alimentador;
- ρ_i : carregamento médio do transformador i. $0 \leq \rho_i \leq 1$

O algoritmo para estimar o carregamento dos transformadores compreende os seguintes passos:

- i. Calcular a potência aparente medida e injetada no nó inicial do alimentador usando os valores da corrente e da tensão pré-falta medidas na saída do alimentador;
- ii. Calcular o somatório das potências nominais dos transformadores instalados no alimentador, utilizando os dados da base de dados;
- iii. Estimar a potência inicial de cada transformador de distribuição a partir da equação (89);
- iv. Definir o modelo de carga de cada transformador de distribuição;
- v. Executar o fluxo de potência e comparar se as tensões e correntes após a convergência são iguais às medidas;
- vi. Se as tensões e correntes calculadas forem iguais às medidas terminar. Caso contrário, ir para o passo vii;
- vii. Por meio da potência calculada no passo i e das tensões e correntes calculadas no passo v, calcular a nova potência aparente estimada para o nó inicial através da equação (90);

$$S_{SE}^{k+1} = S_{SE}^k + [S_{SE}^{med} - V_{calc}^k \cdot (I_{calc}^k)^*] \quad (90)$$

Sendo:

- S_{SE}^{k+1} : nova potência aparente estimada para a subestação;
- S_{SE}^k : potência aparente estimada para a subestação na iteração k;
- S_{SE}^{med} : potência aparente medida na subestação;
- V_{calc}^k : tensão calculada no passo v;
- I_{calc}^k : corrente calculada no passo v.

- viii. Reestimar as novas potências dos transformadores e retornar ao passo v até que a convergência seja obtida.

4.2.4 Estimativa da Corrente de Falta

A corrente de falta é estimada considerando-se que são conhecidas as tensões e correntes em todas as barras do sistema (fluxo de potência pós-falta), e a corrente total pós falta, medida na SE. Uma falta no sistema de distribuição é tratada como sendo uma carga conectada ao sistema. A cada iteração a corrente de falta é recalculada através da Equação (91) sendo, então, injetada no nó analisado.

$$I_f = I_{SE} - \sum_{i=1}^{nt} I_i \quad (91)$$

Sendo:

- I_{SE} : corrente pós-falta medida no nó inicial do alimentador;
- I_i : corrente de carga no transformador i;
- nt : número total de transformadores instalados no alimentador.

O uso dessas injeções de correntes faz com que não seja necessária nenhuma hipótese com relação à impedância de falta, já que esta não aparece na modelagem da falta.

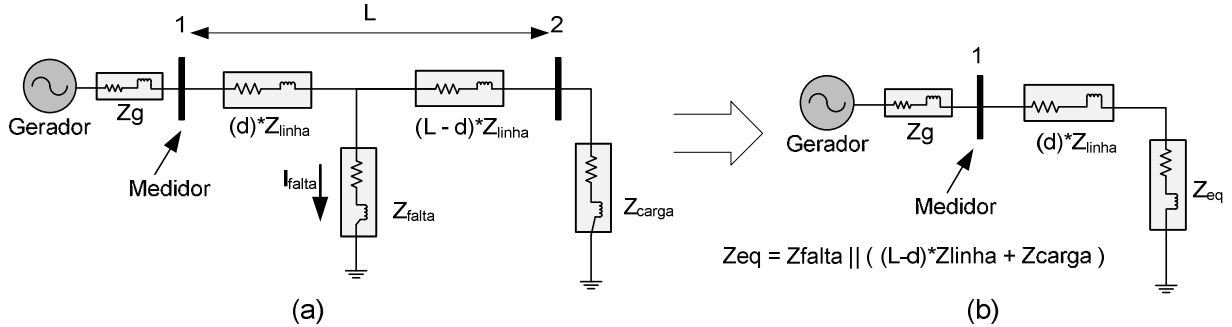
4.2.5 Cálculo dos Desvios de Tensão

As faltas ocorridas nos sistemas de distribuição geralmente produzem quedas de tensões com diferentes magnitudes, porém, em alguns casos, podem apresentar quedas de mesma magnitude. A Figura 38 (a) apresenta um modelo de sistema simples em falta, sendo que um medidor é instalado apenas na saída da subestação (SE). Supondo-se a existência de duas faltas nesta mesma linha, mas em diferentes locais ($d_1 \neq d_2$) e condições ($Z_{f1} \neq Z_{f2}$) tem-se:

$$\text{Falta 1:} \quad Z_1 = d_1 \cdot Z_{\text{linha}} \quad \text{e} \quad Z_{\text{falta}} = Z_{f1} \quad (92)$$

$$\text{Falta 2:} \quad Z_2 = d_2 \cdot Z_{\text{linha}} \quad \text{e} \quad Z_{\text{falta}} = Z_{f2} \quad (93)$$

Figura 38 - Modelo de um sistema simples sob falta.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

De acordo com a Figura 38 (b), os fasores das tensões obtidos pelos medidores são:

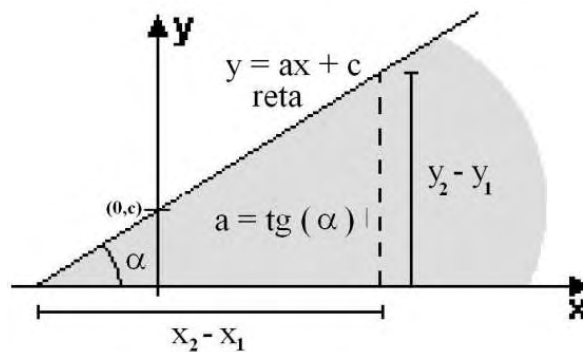
$$V_{\text{falta1}}^{\text{medidor}} = \frac{E_{\text{gerador}} * (Z_1 + Z_{\text{eq1}})}{(Z_g + Z_1 + Z_{\text{eq1}})} \quad \text{e} \quad V_{\text{falta2}}^{\text{medidor}} = \frac{E_{\text{gerador}} * (Z_2 + Z_{\text{eq2}})}{(Z_g + Z_2 + Z_{\text{eq2}})} \quad (94)$$

Supondo-se $Z_2 > Z_1$, implica que $d_2 > d_1$ e que a falta 2 ocorre em um local mais distante do ponto de medição. Sendo assim, podem existir alguns valores de Z_{f1} e Z_{f2} de tal forma que $|V_{\text{medidor1}}| = |V_{\text{medidor2}}|$, ou seja, se Z_{f1} for maior que Z_{f2} pode ocorrer que a queda de tensão em $Z_1 + Z_{\text{eq1}}$ seja igual à queda de tensão em $Z_2 + Z_{\text{eq2}}$. Porém, apesar das quedas de tensões poderem ser iguais, os seus respectivos ângulos de fase não o serão. Como as faltas são afetadas principalmente pela parte resistiva da Z_{falta} , elas produzirão diferentes mudanças de ângulos de fase em comparação com as impedâncias das linhas. Esta diferença ocorre porque as impedâncias das linhas sempre possuem uma parte indutiva maior ou igual à sua parte resistiva. Assim, usando-se a mudança de ângulo de fase em adição às diferenças de magnitudes dos afundamentos de tensão acaba-se com o problema de múltipla estimação que a maioria das técnicas propostas na literatura apresenta (BOLLEN, 2000).

Para cada medidor alocado no sistema pode-se calcular a diferença entre seu valor medido e o valor calculado pelo programa de localização de faltas.

A distância entre um ponto medido e um trecho da linha pode ser calculada unindo o próprio ponto à reta através de um segmento de reta que deverá formar um ângulo de 90° com a reta. Para estabelecer a distância entre os dois necessita-se da equação geral da reta e da coordenada do ponto. Pode-se representar uma reta no plano cartesiano por meio de sua condição geométrica ou por uma equação matemática. Em relação à equação matemática, a reta pode ser escrita nas seguintes formas: reduzida, segmentária, geral ou paramétrica. Seja, inicialmente a representação reduzida de reta ($y = ax + c$), conforme Figura 39.

Figura 39 – Cálculo da distância de um ponto à uma reta.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Dados dois pontos $P_1=(x_1,y_1)$ e $P_2=(x_2,y_2)$ no plano cartesiano, existe uma única reta que passa por esses pontos. Para a determinação da equação da reta existe a necessidade de duas informações: o *coeficiente angular* da reta e o *coeficiente linear* da reta. O coeficiente angular (a) representa a inclinação da reta em relação ao eixo das abscissas (x) e o coeficiente linear (c) representa o valor numérico por onde a reta passa no eixo das ordenadas (y).

Sendo assim, o *coeficiente angular*, a , pode ser calculado através da equação (95).

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (95)$$

E o *coeficiente linear*, c , pode ser calculado substituindo-se qualquer um dos pontos, P_1 ou P_2 , na equação reduzida da reta, assim:

$$c = y_i - ax_i \quad i = 1, 2 \quad (96)$$

Com isso, escreve-se a equação geral da reta $s: ax + by + c = 0$. Estabelecendo a equação geral da reta $s: ax_0 + by_0 + c = 0$ e a coordenada do ponto $P(x_0, y_0)$, obtém-se expressão para calcular a distância entre o ponto P e a reta s :

$$d = \frac{|aX_0 + bY_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (97)$$

Sendo:

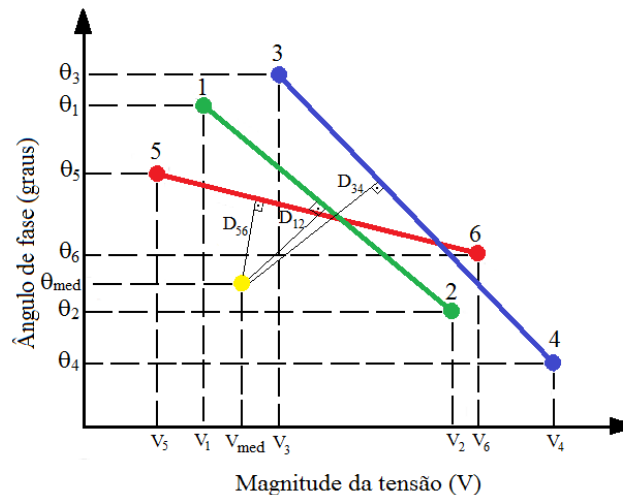
- a : Coeficiente angular;
- b : -1;
- c : Coeficiente linear.

Substituindo-se em (95)-(98) os índices X_i e Y_i pelas quedas de tensão V_i^{med} e ângulos de fase θ_i^{med} medidos em cada barra i , tem-se:

$$d_i = \frac{|aV_i^{med} - \theta_i^{med} + c|}{\sqrt{a^2 + (-1)^2}} \quad (98)$$

A Figura 40 apresenta um exemplo de classificação das linhas através do cálculo da distância entre o valor medido e as linhas candidatas, para um medidor alocado ao longo da rede de distribuição.

Figura 40 – Cálculo da distância entre o ponto em falta e as linhas candidatas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Assim, a linha que conecta as barras 5 e 6 (em vermelho) apresentam a menor distância (D_{56}) em relação ao valor medido (ponto amarelo). Desta forma, é possível classificar as linhas em relação ao erro de distância encontrado para cada medidor.

4.2.6 Identificação da Seção em Falta

Após o cálculo dos desvios de tensão dar-se-á início à definição e identificação da seção em falta, através da indicação dos prováveis nós em falta. Assim, com os valores das distâncias d_i , calculadas para cada barra i do sistema, com j medidores de tensão, é possível calcular as distâncias máximas e mínimas para cada fase, sendo:

$$d_i^{max} = \max \{ d_{ij} \} \quad \text{e} \quad d_i^{min} = \min \{ d_{ij} \} \quad (99)$$

Sendo:

- i : barra candidata i em análise;
- j : Número de medidores, i.e., $j = 1, \dots, NM$;
- d_{ij} : distância entre ponto em falta medido e calculado para a barra i , referente ao medidor j .

Utilizando esses valores, uma variação var_i para as distâncias máximas e mínimas de todos os medidores pode ser calculada através da equação (100):

$$var_i = \frac{1}{(d_i^{max} - d_i^{min}) + \varepsilon} \quad (100)$$

Sendo:

- ε : número pequeno para evitar divisão por zero;

Somente os valores fornecidos pela equação (100) não são suficientes para definir os locais em falta. Para condições ideais, os d_i^{max} e d_i^{min} são nulos, pois as tensões medidas e calculadas são iguais. Considerando agora a presença de mais de uma fase envolvida em uma falta, a localização de falta pode ser dada por:

$$delta_i = \max \{ var_i^k \} \quad (101)$$

Sendo:

- k : fase a, b ou c , dependendo do tipo de falta e número de fases envolvidas.

Ordenando o resultado da equação (101) de forma crescente e normalizando-o em relação ao valor máximo $delta_i^{max}$ encontrado em todas as amostras analisadas, tem-se a classificação final da localização de falta da seguinte forma:

$$lf_i = \left(\frac{delta_i}{delta_i^{max}} \right) * 100 \quad (102)$$

Assim, a equação (102) fornece os índices de classificação dos prováveis nós ou ramos em falta, variando em uma escala entre 0 e 100 %, sendo que o maior valor de lf_i corresponde à menor variação de var_i , ou seja, o menor desvio das distâncias máximas e mínimas encontradas, conforme pode ser observado na equação (100).

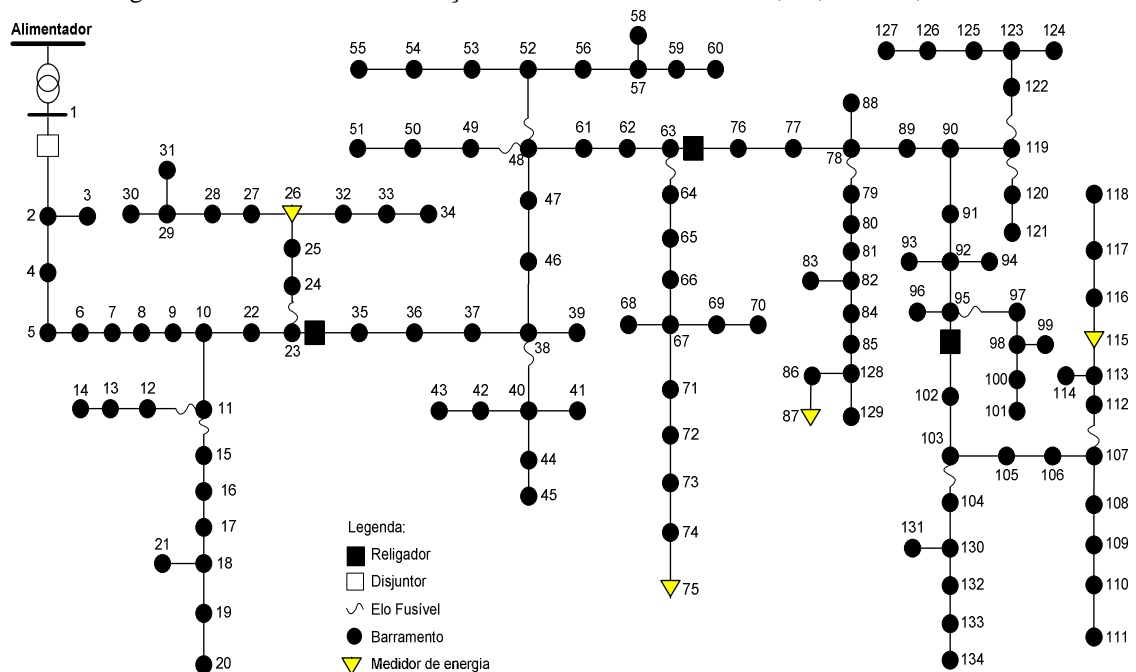
5 Testes e Resultados

Neste capítulo serão apresentados os testes realizados e os resultados encontrados com a utilização dos algoritmos inteligentes propostos anteriormente, aplicados em um sistema de distribuição trifásico real de 134 barras, tensão nominal de 13,8 kV e potência nominal de 7,065 MVA, apresentado na Figura 41, cujos dados podem ser encontrados no Apêndice A.

5.1 Algoritmo de Detecção e Classificação de Distúrbios

Os sinais de entrada, submetidos aos algoritmos desenvolvidos neste trabalho, foram gerados a uma frequência de amostragem de 7,68 kHz através do software “*Alternative Transients Program*” – ATP (COMITE ARGENTINO DE USUÁRIOS DEL EMTP/ATP, 2002). Para tanto, foi modelado o sistema de distribuição trifásico real de 134 barras, tensão nominal de 13,8 kV e potência nominal de 7,065 MVA apresentado na Figura 41, no qual os elementos que compõem a rede elétrica são representados pelo modelo “ π ” no ATP, adequado para linhas de distribuição onde o acoplamento entre circuitos deve ser representado. Esta representação pode ser vista no item IV-B (“Branch cards for mutually coupled RLC elements”) do ATP Rule Book (2002). Os sinais das tensões e correntes foram simulados aplicando-se situações de faltas em diversos pontos do sistema, com as inserções dessas faltas apresentando ângulos de incidência variados e diversos valores de resistências de falta.

Figura 41 – Sistema de distribuição trifásico real de 134 barras, 13,8 kV e 7,065 MVA.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Tabela 9 apresenta-se a quantidade dessas simulações realizadas e utilizadas durante a fase de treinamento das RNAs responsáveis pelas análises de curto-circuito. As 133 simulações, presentes em cada bloco da Tabela 9, correspondem ao número total de barras presentes no sistema, excluindo-se a barra de geração, ou seja, da barra 2 até a última barra do sistema, de número 134.

Tabela 9 – Simulações realizadas para as análises de curto-circuito.

Res. F-T	10 Ω			20 Ω			30 Ω			40 Ω			Total	
	Ângulo	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°		90°
Fase													Total	
A	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	1596
AB	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	1596
ABC	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	1596
ABCT	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	1596
ABT	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	1596
B	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	1596
BC	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	1596
BCT	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	1596
C	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	1596
CA	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	1596
CAT	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	1596
Total	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1463	17556

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.1.1 Detecção dos Distúrbios e Localização no Tempo

Como ilustração da detecção de um distúrbio de corrente e sua localização no tempo, é apresentada a seguir a evolução de um sinal contendo um curto-circuito causado por uma falta fase A à terra de 20,0 Ω na barra 43, iniciada após 0,08333 segundos. Uma comparação entre o sinal de entrada e o sinal de referência é o meio utilizado pelo programa para a detecção do distúrbio, conforme descrito no capítulo anterior.

Na Tabela 10 apresenta-se a detecção do distúrbio, na qual se pode observar que a variância máxima dos coeficientes de detalhes atinge um valor superior ao triplo do desvio padrão na 18ª janela e que o maior coeficiente de detalhe, calculado para a janela sob análise, supera o valor de γ preestabelecido. Sendo assim, a falta é detectada após 0,08372 segundos, referente à amostra de número 323 do sinal registrado.

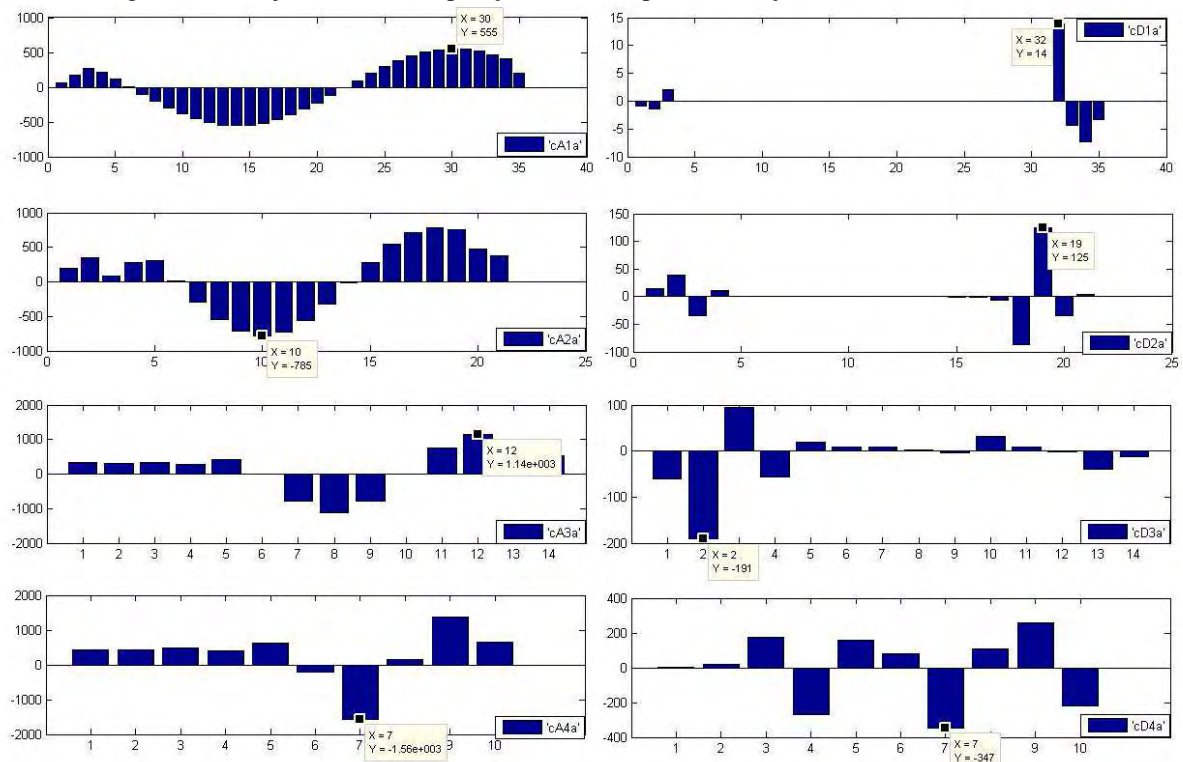
Tabela 10 – Detecção de um distúrbio de corrente na fase A.

Janela de Detecção	$\max[var_{ij}]$	$3\sigma_{ij}$	$\max[d_{ij}^k]$	γ_j
10	177,3	298,2	299,4	281,6
11	227,4	326,7	313,5	281,2
12	176,4	297,7	298,9	281,6
13	227,5	326,7	313,8	281,2
14	175,4	297,2	298,3	281,6
15	227,5	326,7	314,0	281,2
16	174,5	296,8	297,8	281,6
17	227,6	326,7	314,3	281,2
18	823,7	571,3	544,6	281,6

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 42 representam-se os quatro primeiros níveis de decomposição em AMR da 18ª janela, com a detecção do distúrbio de corrente em questão. Sendo que as imagens da esquerda representam os coeficientes de aproximação i da fase A ($cAia$) e as imagens da direita representam os coeficientes de detalhe i da fase A ($cDia$).

Figura 42 – 18ª janela da decomposição em AMR para a detecção do distúrbio de corrente.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tendo sido detectado o distúrbio em um sinal amostrado, o algoritmo registra 10 ciclos completos desse sinal, sendo 4 ciclos pré-falta e 6 pós-falta e, em seguida, se inicia a fase de classificação desses distúrbios.

5.1.2 Análise da Qualidade de Energia

Os eventos de qualidade de energia, referentes às tensões, foram gerados somando-se ao sinal senoidal em regime do sistema, gerado através do software ATP, um vetor contendo o respectivo distúrbio, gerado através do software Matlab. Na Tabela 11 apresentam-se as equações paramétricas utilizadas para a geração dos diferentes tipos de distúrbios considerados neste trabalho.

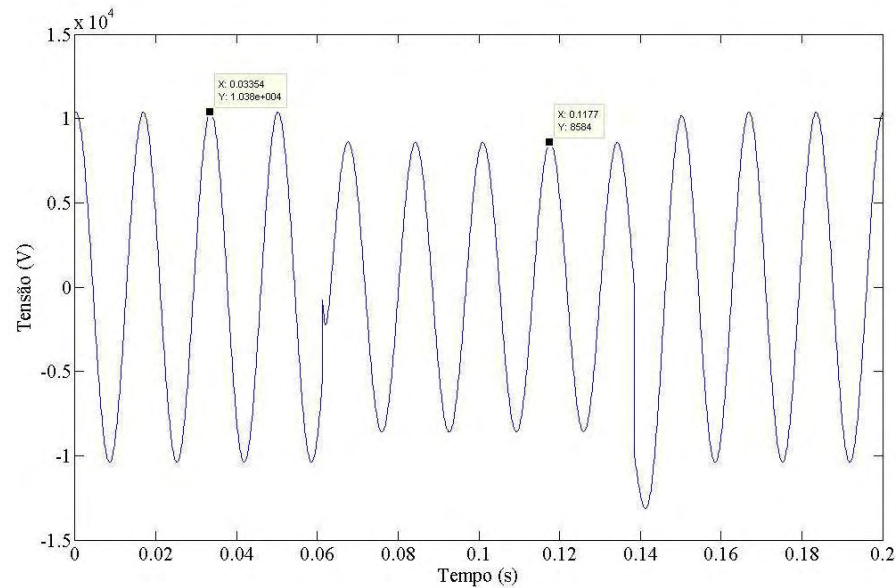
Tabela 11 - Equações paramétricas para os distúrbios de qualidade de energia.

Evento	Equação	Parâmetros
Normalidade (N)	$x(t) = A \cos(wt)$	$w = 2\pi f \text{ rad/s}$
Afundamento (A)	$x(t) = -A\alpha[u(t - t_a) - u(t - t_b)] \cos(wt)$ $t_b > t_a \text{ e } u(t) = \begin{cases} 1 \text{ se } t \geq 0 \\ 0 \text{ se } t < 0 \end{cases}$	$0,05 \leq \alpha \leq 0,9$
Interrupção (I)		$0,9 < \alpha \leq 1,0$
Elevação (E)	$x(t) = A\alpha[u(t - t_a) - u(t - t_b)] \cos(wt)$	$0,05 \leq \alpha \leq 1,0$
Transitórios Oscilatórios (T)	$x(t) = A\alpha e^{-\frac{(t-t_a)}{\tau}} [u(t - t_a) - u(t - t_b)] \cos(2\pi f_n t)$	$0,1 \leq \alpha \leq 0,8$ $300 \leq f_n \leq 900$ $0,01 \leq \tau \leq 0,05$
Distorções Harmônicas (H)	$x(t) = A[\alpha_3 \cos(3wt) + \alpha_5 \cos(5wt) + \alpha_7 \cos(7wt) + \alpha_9 \cos(9wt) + \alpha_{11} \cos(11wt) + \dots]$	$0 \leq \alpha_3 \leq 0,3$ $0 \leq \alpha_5, \alpha_7 \leq 0,2$ $0 \leq \alpha_9, \alpha_{11} \leq 0,1$
Spikes (S)	$x(t) = A u(\cos(wt)) \left\{ \sum_{n=0}^9 k [u(t - (t_a + 0,02n)) - u(t - (t_b + 0,02n))] \right\}$	$0,1 \leq k \leq 0,4$
Flickers (F)	$x(t) = A\alpha \cos(2\pi\beta t) \cos(wt)$	$0,01 \leq \alpha \leq 0,25$ $5 \leq \beta \leq 20$

Fonte: adaptado de Lee e Shen (2011).

O primeiro passo da análise de distúrbios de tensão refere-se ao cálculo da diferença entre a energia do sinal pré-falta e a energia do sinal pós-falta. Para estimar a amplitude do distúrbio o algoritmo retém os valores de pico da tensão do primeiro nível de aproximação (A1), antes e durante o distúrbio. A diferença entre estes dois valores indica a variação na amplitude do sinal em regime, que caracteriza a amplitude do distúrbio. Na Figura 43 apresenta-se a primeira versão de aproximação (A1) de um sinal contendo um afundamento de tensão na Fase A da barra 25, como exemplo de cálculo da amplitude do distúrbio. Neste exemplo o valor de pico antes do distúrbio assumiu um valor igual a 10.379,07 e o valor durante o distúrbio igual a 8.584,06, correspondendo a uma variação na amplitude do distúrbio de 17,3%.

Figura 43 - Exemplo de estimação da amplitude de um afundamento de tensão.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Tabela 12 apresentam-se os conjuntos de treinamentos realizados e de testes encontrados para uma RNA responsável pela classificação dos eventos de qualidade de energia que ocorrem na fase A do sistema, compostos por diferentes tipos e números de simulações. As 11.704 simulações realizadas serviram para gerar as formas de onda trifásicas dos medidores de tensão localizados nas barras 26, 75, 87 e 115, conforme alocação otimizada proposta por Bíscaro (2009) e que pode ser observada na Tabela 12.

Tabela 12 – Conjuntos de treinamentos e testes realizados para os eventos de QE na Fase A.

		Treinamentos realizados (dados do medidor 26)														Total		
		N	E	A	I	E+H	A+H	T	E+T	A+T	F	E+F	A+F	S	E+S	A+S	Total	
Testes encontrados (dados do medidor 75)	N	1147									41						1188	
	E		160										17				177	
	A			801		1				2				240			1044	
	I				1951												1951	
	E+H					1	1240										1241	
	A+H	2						350				1					353	
	T								177								177	
	E+T									177							177	
	A+T										1235			2			1237	
	F	92						5				490					587	
	E+F		17										161				178	
	A+F			440		1					5			998			1444	
	S														270	33	9	312
	E+S														238	123	111	472
	A+S														24	22	1120	1166
Total		1241	177	1242	1951	1242	355	177	177	1242	532	178	1240	532	178	1240	11704	
Acertos		92%	90%	64%	100%	100%	99%	100%	100%	99%	92%	90%	80%	51%	69%	90%	89%	

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Utilizando os dados de treinamento apresentados na Tabela 12, várias redes foram treinadas, uma para cada fase do sistema e para cada medidor alocado (Figura 41). Assim, ao final, tem-se 12 redes neurais treinadas para identificar os diferentes tipos de eventos de qualidade de energia apresentados na Tabela 11. Os eventos mais identificados pelas RNAs, após a avaliação de todas as redes, é o que prevalece e será o evento que constará no relatório de saída. Os parâmetros de vigilância ρ_a e ρ_b adotados para o treinamento das 12 redes foram 0,85 e 0,95, respectivamente. O parâmetro de vigilância do módulo inter-ART utilizado foi 0,99 e a taxa de treinamento, tanto para as redes ARTa quanto para as redes ARTb foi 1,0.

Para avaliar a eficiência operacional e robustez dessas 12 redes neurais pós-treinamento, os dados registrados nos quatro pontos de medição foram submetidos a todas as redes, ou seja, cada rede foi treinada utilizando um conjunto de 11.704 simulações e, em seguida, testada com as simulações registradas nos outros medidores espalhados pela rede. Na Tabela 13 apresentam-se os resultados encontrados para as RNAs treinadas para a classificação dos eventos de qualidade de energia ocorridos na Fase A.

Tabela 13 – Eficiência operacional das RNAs treinadas para eventos de QE na Fase A.

Treinamento	Medidor	Operação				Media
		26	75	87	115	
	26	100,0%	88,9%	88,7%	87,4%	91,2%
	75	88,9%	100,0%	97,5%	93,2%	94,9%
	87	88,2%	97,3%	100,0%	94,5%	95,0%
	115	85,3%	91,9%	93,2%	100,0%	92,6%
	Media	90,6%	94,5%	94,8%	93,8%	93,4%

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Tabela 14 apresentam-se os resultados encontrados para as RNAs treinadas para classificar os eventos de qualidade de energia ocorridos na Fase B do sistema de distribuição da Figura 41.

Tabela 14 – Eficiência operacional das RNAs treinadas para eventos de QE na Fase B.

Treinamento	Medidor	Operação				Media
		26	75	87	115	
	26	100,0%	90,6%	89,2%	87,1%	91,7%
	75	95,6%	100,0%	96,8%	92,6%	96,3%
	87	89,5%	96,6%	100,0%	93,0%	94,8%
	115	85,5%	92,0%	92,3%	100,0%	92,5%
	Media	92,7%	94,8%	94,6%	93,2%	93,8%

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Tabela 15 apresentam-se os resultados encontrados para as RNAs treinadas para classificar os eventos de qualidade de energia ocorridos na Fase C do sistema de distribuição da Figura 41.

Tabela 15 – Eficiência operacional das RNAs treinadas para eventos de QE na Fase C.

Treinamento	Medidor	Operação				Media
		26	75	87	115	
	26	100,0%	92,2%	91,1%	89,9%	93,3%
	75	92,1%	100,0%	96,7%	95,6%	96,1%
	87	88,1%	95,5%	100,0%	96,5%	95,0%
	115	49,6%	92,1%	91,1%	100,0%	83,2%
	Media	82,4%	94,9%	94,7%	95,5%	91,9%

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Pode-se verificar claramente o alto desempenho dessas RNAs no processo de classificação dos distúrbios de qualidade de energia. O pior desempenho ocorreu na RNA responsável por identificar faltas na fase C, treinada com as oscilografias das tensões registradas no medidor instalado na barra 115. Durante a classificação dos eventos de QE, provenientes das oscilografias de tensão do medidor 26, essa RNA apresentou baixa eficiência, como pode ser observado na Tabela 16.

Tabela 16 – Conjuntos de treinamentos e testes realizados para os eventos de QE na fase C.

Encontrado	Esperado																Total
	N	E	A	I	E+H	A+H	T	E+T	A+T	F	E+F	A+F	S	E+S	A+S	H	
N	482			17	2		6		45	29		62				7	650
E		56									6						62
A			364						33		1	49			1		448
I		112	194	1700	52		74	112	205		105	188		2	1	108	2853
E+H					384							1					385
A+H						65						1					66
T							5	71		167	18		17				278
E+T	5			14				7	65		13						104
A+T			28							393		1	12				434
F	39		384	220	425	107	19		158	198	2	307			17	80	1956
E+F		9									1	59				25	94
A+F	681		271		192				240	226	3	600	18	5	29	4	2269
S													251	28	223		502
E+S										2			1	65	53		121
A+S	36						1			44		3	261	77	918		1340
H				9									2			131	142
Total	1243	177	1241	1951	1064	177	178	177	1241	531	177	1242	531	177	1242	355	11704
Acertos	39%	32%	29%	36%	36%	37%	40%	37%	32%	37%	33%	48%	47%	37%	74%	37%	49,6%

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Das 11.704 simulações submetidas à classificação pela RNA, 5.902 amostras apresentaram classificação incorreta, o que representa 50,4% de erro; valor muito elevado. Neste caso, torna-se de fundamental importância a realização do treinamento continuado da rede, no qual apenas as amostras classificadas erroneamente são apresentadas à rede, sem que haja a necessidade de passar por um retreinamento completo, com todos os dados de medições anteriores. Este treinamento é rápido e eficiente, como se pode observar na Tabela 17, que apresenta os resultados encontrados para a RNA retreinada (atualizada) com 3.000 amostras das 5.902 que falharam no processo de classificação anterior.

Assim, após o treinamento continuado a rede apresentou um alto desempenho (91%), diminuindo o erro de 50,4% para apenas 9%, ou seja, das 5.902 classificações equivocadas, após a apresentação de 3.000 dessas amostras, a rede passou a apresentar erro em apenas 1.051 amostras. Portanto, não foi necessária a apresentação de todas as 5.902 amostras para que a RNA melhorasse sua classificação geral, mostrando ser uma ferramenta computacional altamente eficiente, flexível e adaptável a qualquer sistema de distribuição de energia elétrica.

Tabela 17 – Treinamento continuado da RNA treinada com os dados do medidor 115, na fase C .

		Esperado															Total		
		N	E	A	I	E+H	A+H	T	E+T	A+T	F	E+F	A+F	S	E+S	A+S		H	
Encontrado	N	1194						1			53								1248
	E		139						2			15			2				158
	A			1121						53			258				1		1433
	I				1951							9							1960
	E+H					1064													1064
	A+H						177						3				1		181
	T							175			2		1						178
	E+T		19						175			7							201
	A+T			36						1155			74				1		1266
	F	30						2			461		2						495
	E+F		19									146			1				166
	A+F	17		84						33	14		904						1052
	S													482			248		730
	E+S													7	172	9			188
	A+S													42	2	982			1026
	H	2									1							355	358
Total	1243	177	1241	1951	1064	177	178	177	1241	531	177	1242	531	177	1242	355		11704	
Acertos		96%	79%	90%	100%	100%	98%	99%	93%	87%	82%	73%	91%	97%	79%	100%		91%	

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.1.3 Análises de Curto-Circuito

Para realizar os treinamentos e testes das RNAs responsáveis pela classificação dos tipos de curto-circuito ocorridos na rede de distribuição, as oscilografias das tensões e correntes foram simuladas através do software ATP, aplicando-se situações de faltas em diversos pontos do sistema, com as inserções dessas faltas apresentando ângulos de incidência variados e diversos valores de resistências de faltas. A Tabela 9, apresentada no início do presente capítulo, exibe as 17556 simulações realizadas e utilizadas durante a fase de treinamento das 3 RNAs treinadas para classificar as faltas, na qual se variou a resistência de falta, o ângulo de incidência da falta na forma de onda, o tipo de falta e a barra em falta. Na Tabela 18 apresenta-se um resumo das variáveis utilizadas nas simulações de curto-circuito para o treinamento das RNAs, com suas respectivas variações consideradas, totalizando 17.556 simulações, ou seja, $Total = 4 \times 3 \times 11 \times 133$.

Tabela 18 – Variáveis utilizadas nas simulações dos curtos-circuitos.

Variável	Variação	Total
Resistência de Falta (Ω)	[10 20 30 40]	4
Ângulo de incidência	[0 45 90]	3
Tipo de falta	[A B C AB ABT BC BCT CA CAT ABC ABCT]	11
Barra em Falta	[2 3 4 5 6 7 ... 134]	133
	Total	17.556

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Todas essas simulações foram utilizadas para realizar o treinamento de 3 RNAs, cujas entradas são os índices característicos do sistema. A primeira RNA foi treinada apenas com os índices característicos referentes às oscilografias de corrente, medidas na SE. A segunda RNA foi treinada apenas com os índices característicos referentes às oscilografias de tensão e a terceira RNA foi treinada com ambos os índices característicos. Os parâmetros de vigilância ρ_a e ρ_b adotados para o treinamento das 3 redes foram 0,75 e 0,95, respectivamente. O parâmetro de vigilância do módulo inter-ART utilizado foi 0,98 e a taxa de treinamento, tanto para as redes ARTa quanto para as redes ARTb foi 1,0. O tipo de falta mais identificado pelas RNAs, após a avaliação de todas as redes, é o que prevalece e será o que constará no relatório de saída.

Após o treinamento dessas 3 redes com as 17.556 simulações realizadas anteriormente, a fim de se verificar a eficiência do processo de classificação, foram efetuadas outras 11.704 simulações, utilizando as variáveis apresentadas na Tabela 18, porém, agora

considerando os ângulos de incidência de falta como sendo 30 e 60 graus. Na Tabela 19 apresenta-se a eficiência do processo de classificação encontrado durante os testes realizados com as 3 RNAs.

Tabela 19 – Eficiência das RNAs treinadas para a classificação de curtos-circuitos.

RNA	Índices Característicos de Treinamento	Eficiência
1	Y_{1j}^T, Y_{2j}^T e Y_{3j}^T	97,27 %
2	Y_{4j}^T, Y_{5j}^T e Y_{6j}^T	99,18 %
3	$Y_{1j}^T, Y_{2j}^T, Y_{3j}^T, Y_{4j}^T, Y_{5j}^T$ e Y_{6j}^T	99,79 %

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Pode-se observar claramente o alto desempenho alcançado pelas três RNAs, sendo que o erro apresentado por elas foi praticamente o mesmo, apenas para faltas trifásicas em relação à presença de terra ou não. Na Tabela 20 apresenta-se a resposta da primeira RNA, treinada com os índices característicos de corrente Y_{1j}^T, Y_{2j}^T e Y_{3j}^T , na qual se pode notar perfeitamente este fato.

Tabela 20 – Eficiência das RNAs treinadas com os índices característicos de corrente.

		Encontrado										Total	
		A	AB	ABC	ABCT	ABT	B	BC	BCT	C	CA		CAT
Simulado	A	1064											1064
	AB		1064										1064
	ABC			820	244								1064
	ABCT			75	989								1064
	ABT					1064							1064
	B						1064						1064
	BC							1064					1064
	BCT								1064				1064
	C									1064			1064
	CA										1064		1064
	CAT											1064	1064
Total		1064	1064	895	1233	1064	1064	1064	1064	1064	1064	11704	

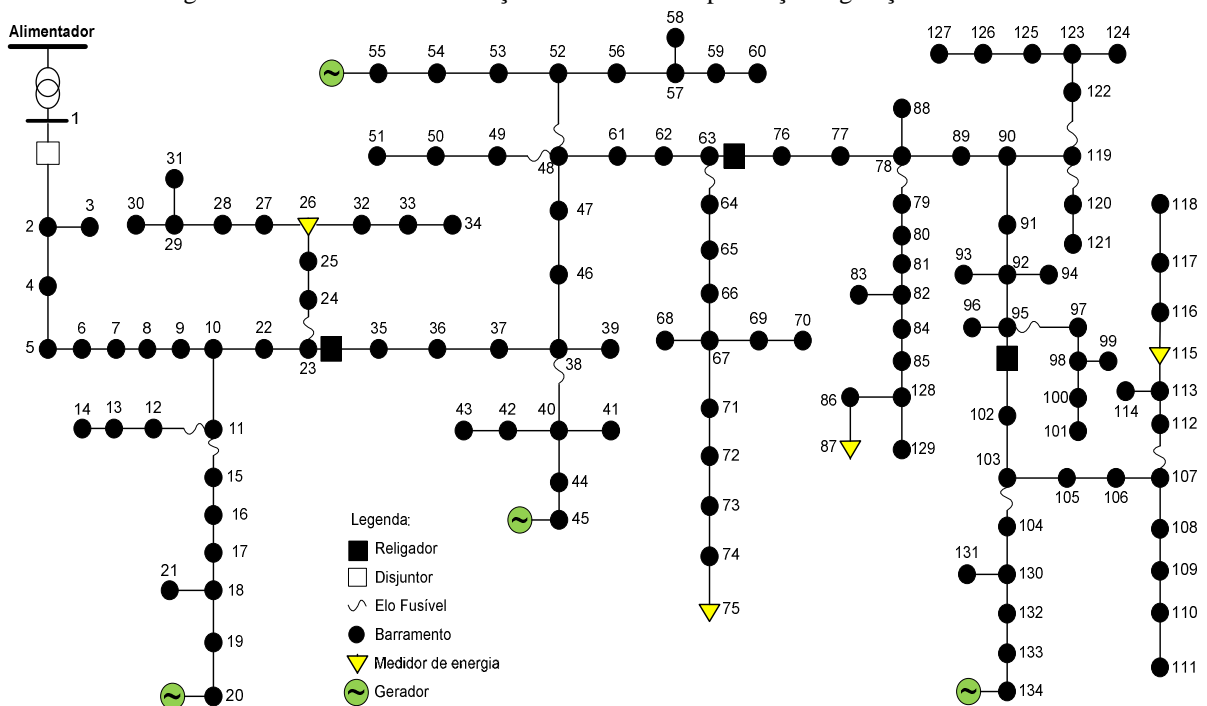
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Como o algoritmo de localização de faltas utiliza apenas a informação das fases em falta, este pequeno erro de classificação não influencia nos resultados, visto que a presença dos curtos-circuitos na rede é representada como injeções de correntes nas fases envolvidas na falta.

5.2 Algoritmo de Localização de Falhas

O sistema de distribuição trifásico real utilizado neste trabalho foi modelado através do software ATP. As oscilografias das tensões, tanto para a subestação quanto para os medidores dispostos ao longo rede e as oscilografias das correntes na subestação foram geradas aplicando-se situações de faltas em diversos pontos do sistema e com diversos valores de resistências de falta. Na Figura 44 apresenta-se novamente o sistema elétrico de distribuição utilizado, porém, agora com a presença de 4 geradores distribuídos conectados à rede, cujos pontos de conexões foram aleatoriamente escolhidos.

Figura 44 - Sistema de distribuição trifásico com a presença de geração distribuída.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

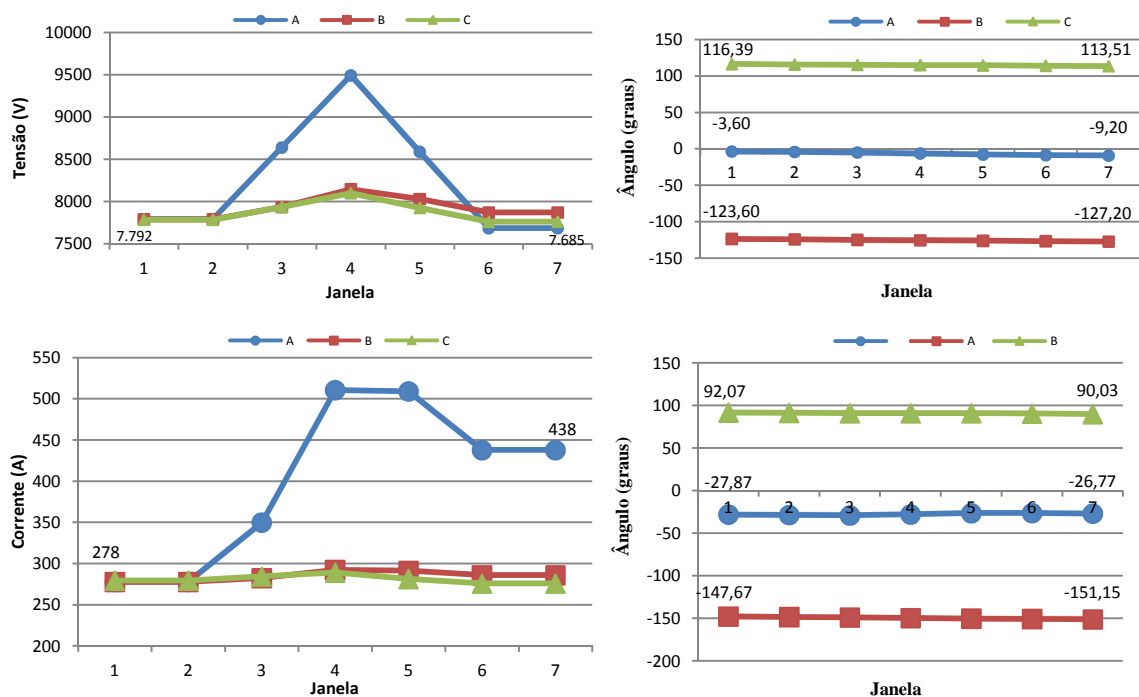
A precisão do algoritmo de localização de faltas é altamente influenciada pela quantidade e posição dos medidores esparsos de tensão. Sendo assim, esses medidores foram alocados segundo a metodologia proposta por Bísvaro (2009). Esta disposição, considerada uma alocação otimizada para o sistema apresentando a composição radial da Figura 44, foi encontrada através de um modelo estocástico probabilístico que definiu como melhores pontos possíveis para a alocação dos medidores as barras de número 26, 75, 87 e 115.

5.2.1 Aquisição e Processamento de Sinais

As oscilografias das correntes e tensões pré-falta e pós-falta foram simuladas utilizando o software ATP. Nessas simulações, utilizou-se o modelo RL série para as linhas de distribuição, sendo que as capacitâncias shunt foram desprezadas e, por motivos de simplicidade, as cargas foram modeladas como impedâncias constantes. As simulações foram feitas levando-se em consideração os transitórios eletromagnéticos das faltas visto que, para tornar essas simulações o mais próximo da realidade, toda a parte referente à aquisição e ao processamento dos sinais foram também consideradas neste trabalho. Assim, os fasores das tensões e correntes utilizados podem apresentar erros de medições provenientes da aquisição e do processamento dos sinais.

Portanto, os fasores das tensões e correntes pré-falta e pós-falta, utilizados para localizar o ponto em falta através do algoritmo de localização de faltas, foram obtidos através da aplicação da transformada rápida de Fourier – FFT (EMBREE, 1999) em amostras do sinal capturadas durante a falta, obtendo-se o espectro de frequências deste sinal, além da magnitude e do ângulo de fase de cada uma das frequências que o compõem. Uma amostra das magnitudes das tensões e correntes pré-falta (medida 1) e pós-falta (medida 7), para uma falta fase A-terra de 10,0 Ohms, ocorrida na barra 70 do sistema de distribuição ilustrado na Figura 44, é apresentada na Figura 45.

Figura 45 - Magnitudes das tensões e correntes na SE para uma falta ocorrida na barra 70, fase A.



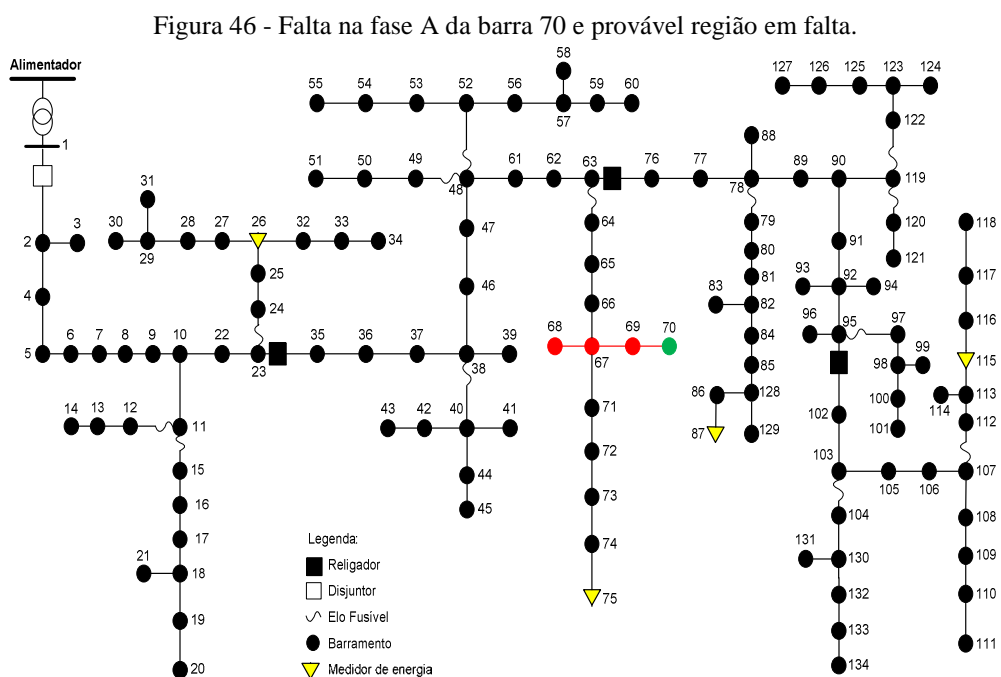
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

5.2.2 Localização das Falhas

O conceito fundamental do algoritmo de localização de falhas é o emprego dos fasores das tensões e correntes pré-falta e pós-falta, no nó inicial do alimentador, associado com a análise dos afundamentos de tensões medidos durante a falta em um conjunto reduzido de nós do alimentador. Este algoritmo apresenta algumas vantagens quando comparado com os algoritmos convencionais para localização de falhas que utilizam medições de correntes e tensões somente no nó inicial, pois se eliminam os pontos que estão em ramais laterais geograficamente distantes do verdadeiro local da falta e que, geralmente, são apontados pelos algoritmos tradicionais, baseados na distância elétrica da falta à subestação.

Para todos os testes apresentados a seguir, nesta subseção, os carregamentos dos transformadores durante o processo de localização de falhas foram estimados empregando-se a proposta apresentada no capítulo 4, subseção 4.2.5, a qual considera que todos os transformadores têm o mesmo fator de potência medido no nó inicial do alimentador e que o carregamento de cada transformador é proporcional à sua potência nominal.

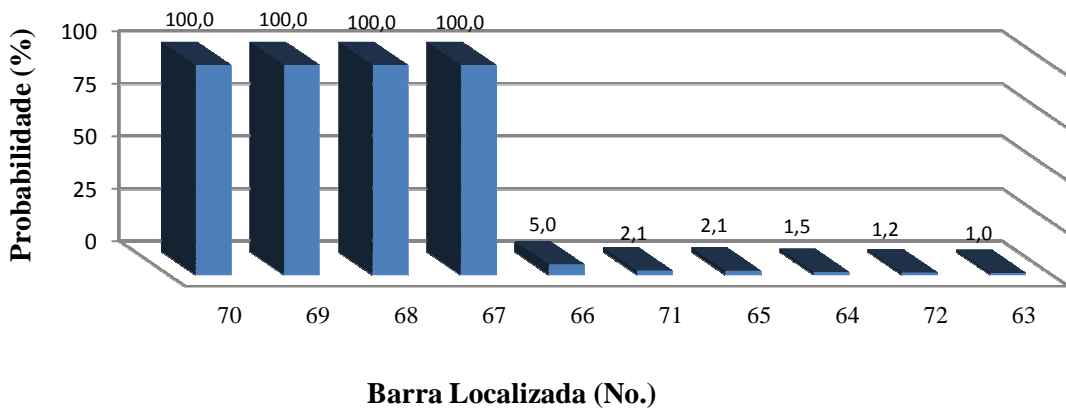
Para uma falta monofásica na fase A, simulada na barra 70 do sistema sem a presença de GDs, com resistência de falta de 10,0 ohms, cujos fasores das correntes e tensões na SE foram apresentados na Figura 45 e cujas cargas foram modeladas como impedância constante e considerando o carregamento nominal dos transformadores, é apresentado na Figura 46 o ponto onde a falta foi simulada (barra verde) e a região, em vermelho, da localização da falta fornecida pelo sistema de localização de falhas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O sistema de localização de faltas não teve dificuldades em classificar as faltas porque estas apresentaram valores bem diferentes para os desvios de tensão, o que mostra uma boa precisão no sistema de localização de faltas. A barra em falta foi classificada na primeira posição, como pode ser observado na Figura 47, na qual se apresenta a classificação das barras segundo a probabilidade de ocorrência de falta.

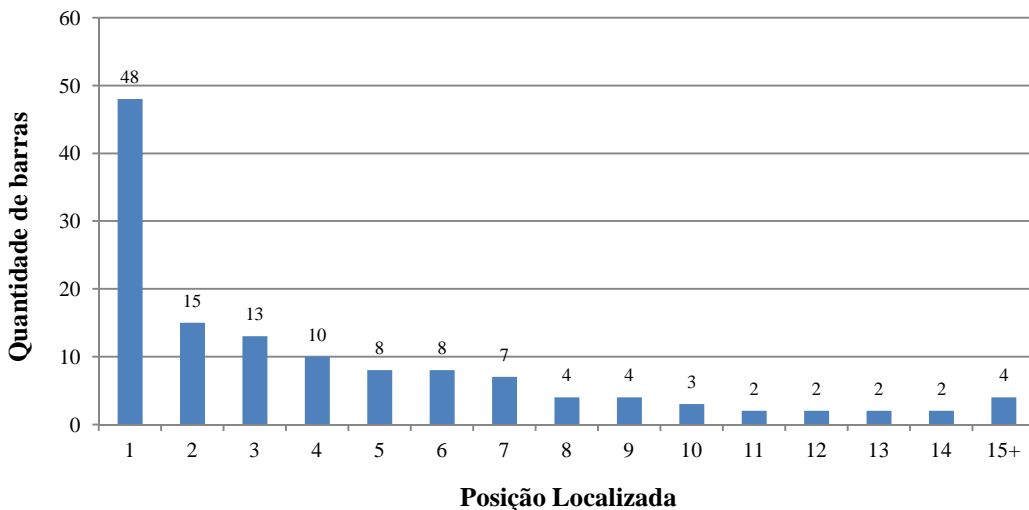
Figura 47 - Classificação das barras para uma falta fase A na barra 70.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para cada barra do alimentador foi aplicada uma falta fase A – terra com resistência de falta de 10,0 ohms, considerando o carregamento nominal dos transformadores e cargas modeladas como impedância constante. A somatória das posições reais das barras localizadas na classificação feita pelo algoritmo de localização de faltas, conforme ilustrado na Figura 47, é representada na Figura 48.

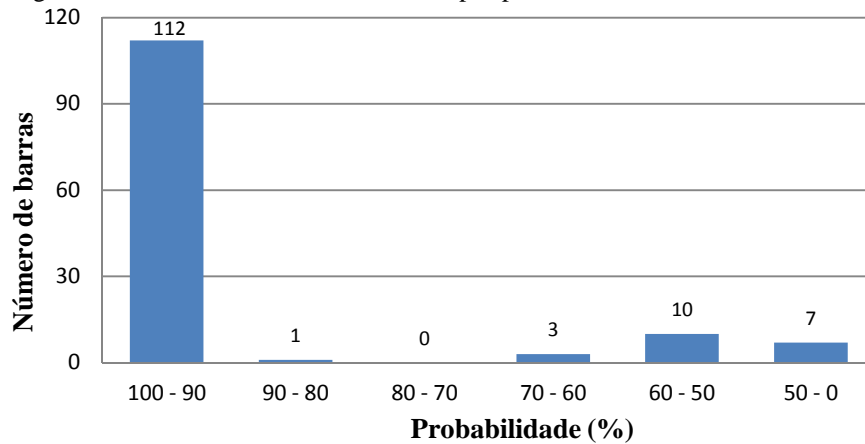
Figura 48 - Número de barras localizadas por posição de classificação para faltas fase A - terra.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 49 apresenta-se o somatório do número de barras encontradas por faixa de variação de probabilidade de ocorrência de falta, ou seja, para cada uma das 133 faltas simuladas, a probabilidade de que aquela barra seja identificada corretamente na região em falta, definida por faixas de probabilidade, é alta, mostrando ser uma boa ferramenta para a localização de faltas do tipo fase-terra.

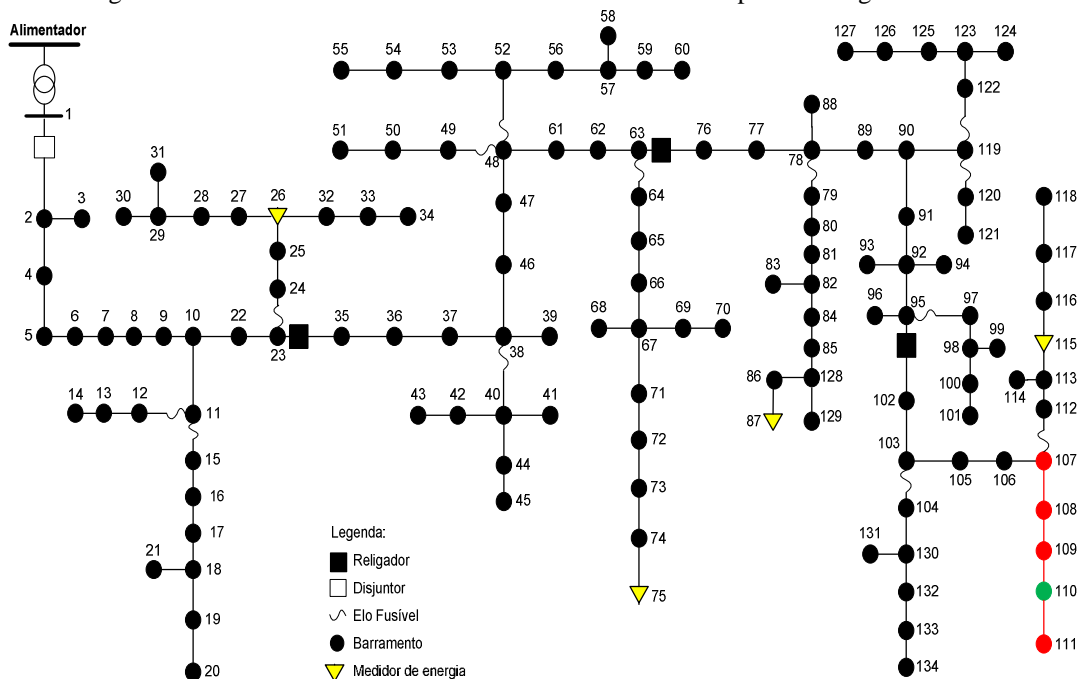
Figura 49 - Número de barras localizadas por probabilidade de ocorrência de falta.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para faltas bifásicas, na Figura 50 apresenta-se o ponto em falta simulado (barra verde) e a região, em vermelho, da localização da falta fornecida pelo sistema de localização, considerando uma falta bifásica entre as fases A e B na barra 100, com resistência de falta entre fases de 1,0 ohm, cargas modeladas como impedância constante e carregamento nominal dos transformadores.

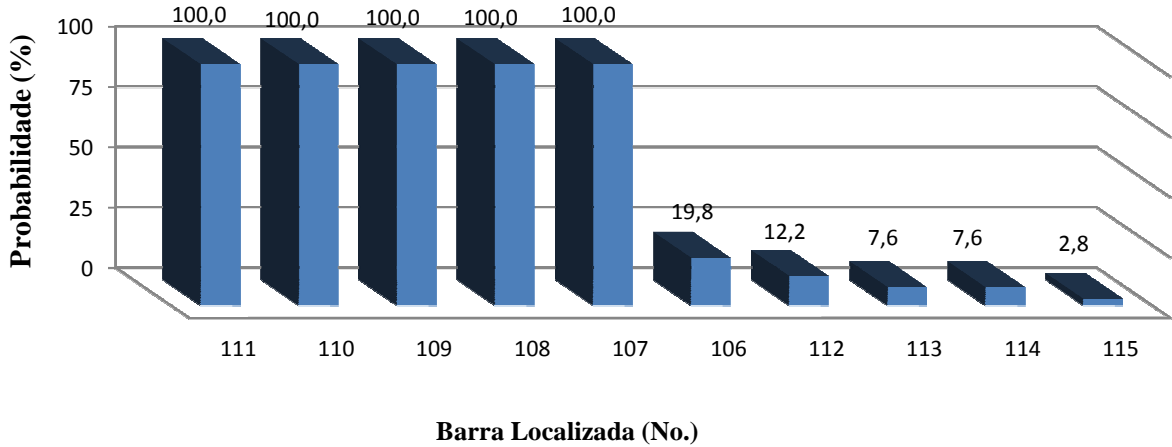
Figura 50 - Falta bifásica entre as fases A e B da barra 110 e provável região em falta.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 51 apresenta-se a classificação das barras feita pelo algoritmo de localização de faltas, na qual é possível identificar claramente a região das 5 prováveis barras em falta.

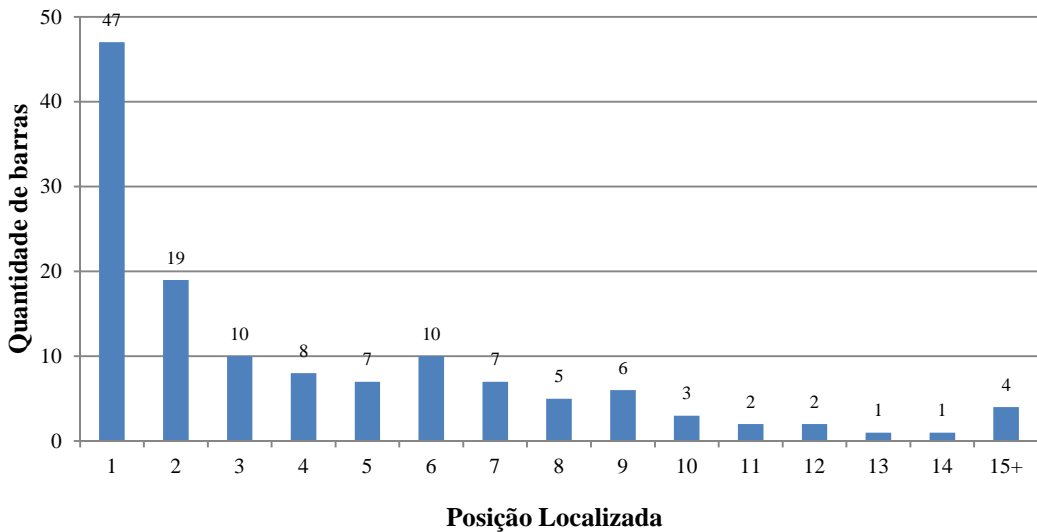
Figura 51 - Classificação das barras para uma falta bifásica entre as fases A e B na barra 110.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

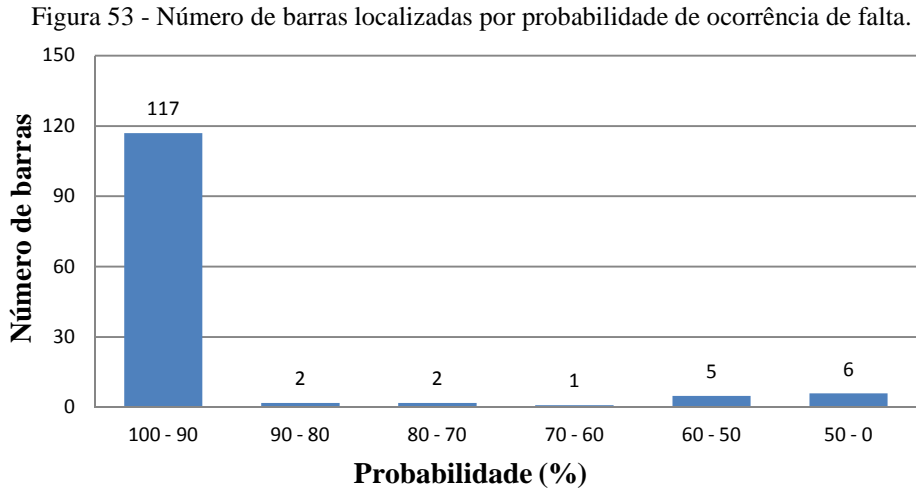
Para testar a eficiência do sistema de localização de faltas proposto em relação à ocorrência de faltas bifásicas, foram simuladas para cada uma das barras do alimentador faltas entre as fases A e B, com resistência de falta entre fases de 1,0 ohm, carregamento nominal dos transformadores e cargas modeladas como impedância constante. A somatória das posições reais das barras localizadas na classificação feita pelo algoritmo de localização de faltas, conforme ilustrado na Figura 51, é apresentada na Figura 52.

Figura 52 - Número de barras localizadas por posição de classificação para faltas bifásicas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

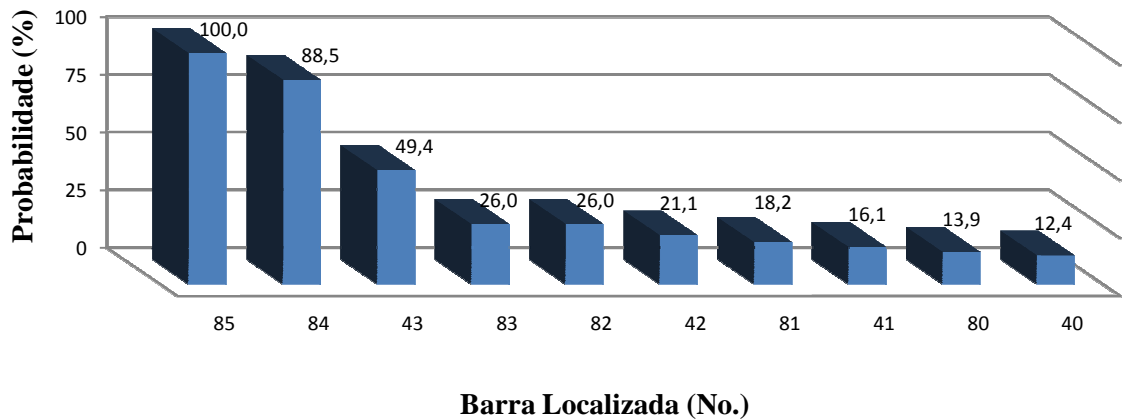
Na Figura 53 apresenta-se o somatório do número de barras encontradas por faixa de variação de probabilidade de ocorrência de falta. Assim, para cada uma das 133 faltas simuladas, a probabilidade de que aquela barra seja identificada corretamente na região em falta, definida pelas faixas de probabilidade é alta, apresentando o mesmo padrão verificado para faltas monofásicas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Por último, para verificar a eficiência do sistema de localização de faltas proposto em relação à ocorrência de faltas trifásicas, foram simuladas faltas sem a presença de aterramento, considerando uma resistência de falta entre fases de 1,0 ohm, carregamento nominal dos transformadores e cargas modeladas como impedância constante. A posição real das barras localizadas na classificação feita pelo algoritmo de localização de faltas para uma falta trifásica na barra 85 é apresentada na Figura 54.

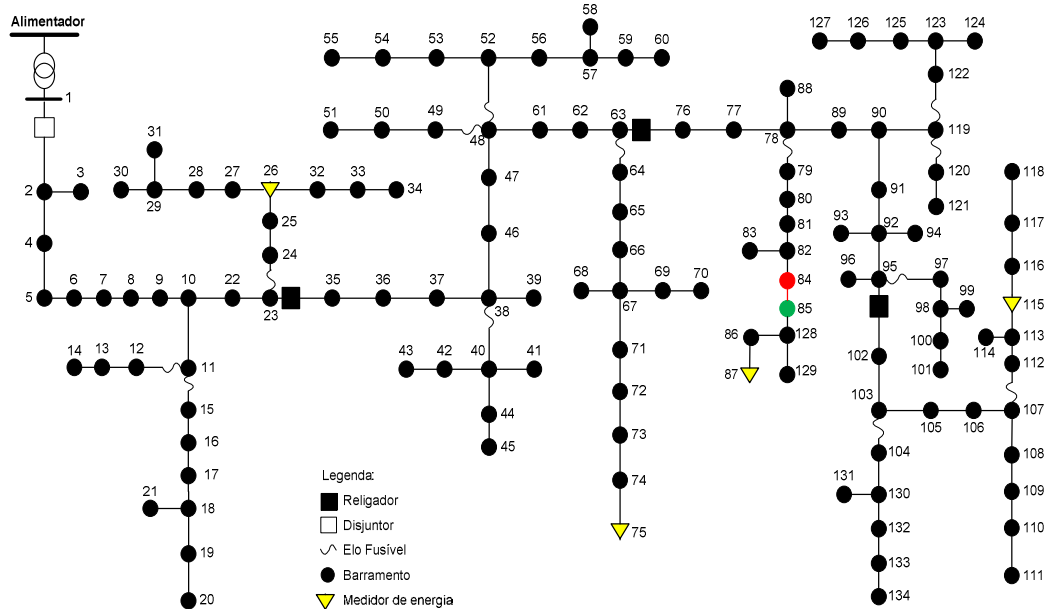
Figura 54 - Classificação das barras para uma falta trifásica na barra 85.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 55 apresenta-se o ponto em falta simulado (barra verde) e a região, em vermelho, da localização da falta fornecida pelo sistema de localização para uma falta trifásica na barra 85. Neste caso, o sistema de localização de faltas identificou de forma bem específica a região em falta.

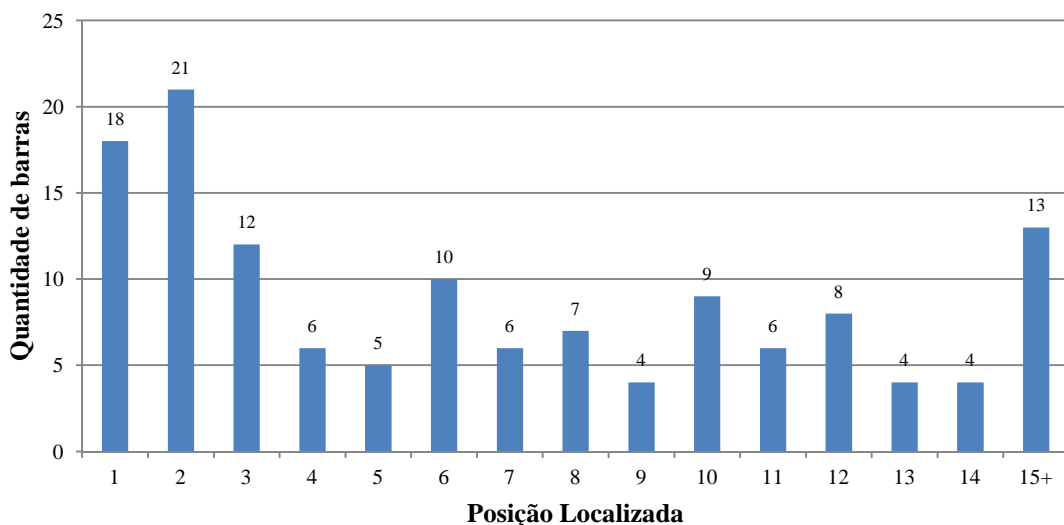
Figura 55 - Falta trifásica na barra 85 e provável região em falta.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Foram simuladas, para cada uma das barras do alimentador, faltas trifásicas sólidas, com resistência de falta entre fases de 1,0 ohm, considerando o carregamento nominal dos transformadores e cargas modeladas como impedância constante. A somatória das posições reais das barras localizadas pelo algoritmo de localização de faltas, conforme ilustrado na Figura 54, é apresentada na Figura 56.

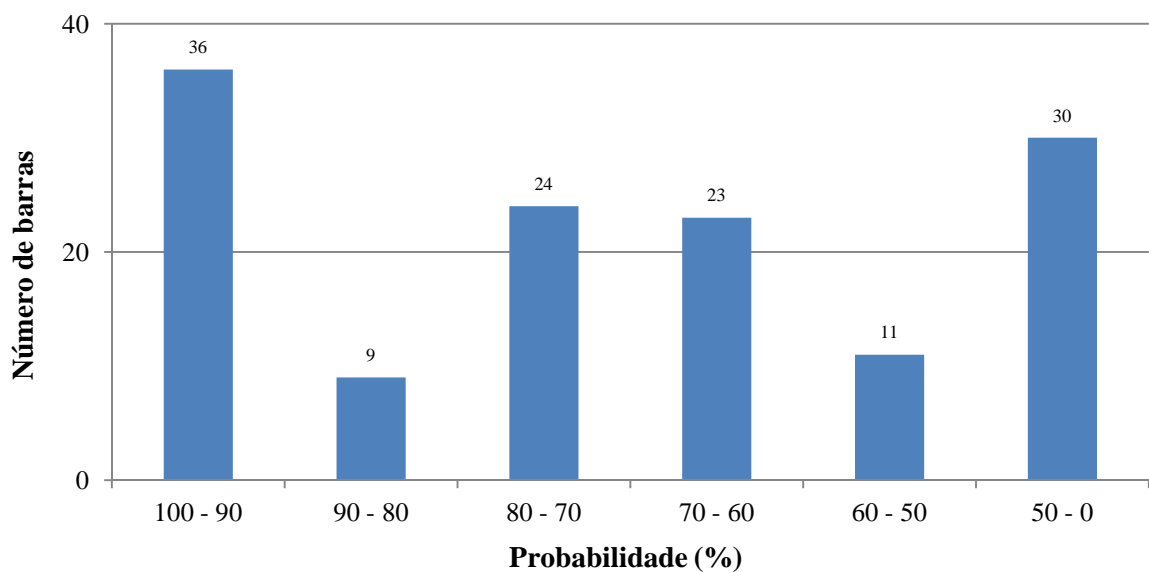
Figura 56 - Número de barras localizadas por posição de classificação para faltas trifásicas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 57 apresenta-se o número de barras encontradas por faixa de variação de probabilidade de ocorrência de falta. Assim, para cada uma das 133 faltas simuladas, a probabilidade de que aquela barra seja identificada corretamente na região em falta, definida pelas faixas de probabilidade variou bastante, porém, conforme observado na Figura 56, a quantidade de barras localizadas entre as 14 primeiras posições representa cerca de 90% do total. Sendo assim, apesar do sistema de localização encontrar uma baixa probabilidade da ocorrência da falta para as barras simuladas, a área de busca continua pequena, fornecendo bons resultados.

Figura 57 - Número de barras localizadas por probabilidade de ocorrência de falta.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Como as faltas trifásicas representam o pior caso de curto-circuito e também são as que ocorrem em menor número nos sistemas de distribuição, estes resultados são considerados satisfatórios, sendo que, para se melhorar o desempenho do algoritmo de localização de faltas em relação a esses tipos de faltas, basta realocar os medidores de energia ao longo da rede utilizando metodologias de alocação otimizada de medidores, como a proposta por Bísvaro (2009). A quantidade e a posição dos medidores de energia influenciam diretamente no desempenho do algoritmo de localização de faltas. Esta influência é analisada mais adiante.

5.2.3 Influência das Resistências de Falta Fase-terra

O valor da resistência de falta influencia diretamente na eficiência do algoritmo de localização de faltas. Para testar tal influência, faltas na fase A - terra para todas as barras do sistema foram simuladas, variando-se o valor da resistência de falta, como pode ser observado na Tabela 21. Nessas simulações de faltas, realizadas através do software ATP, as cargas foram modeladas como impedâncias constantes e o sistema foi considerado com carregamento nominal. Já para o sistema de localização de faltas proposto, as cargas foram modeladas também como sendo de impedâncias constantes e considerando-se o carregamento nominal para os transformadores de distribuição. Na Tabela 21 apresenta-se a influência da resistência de falta no processo de classificação das barras.

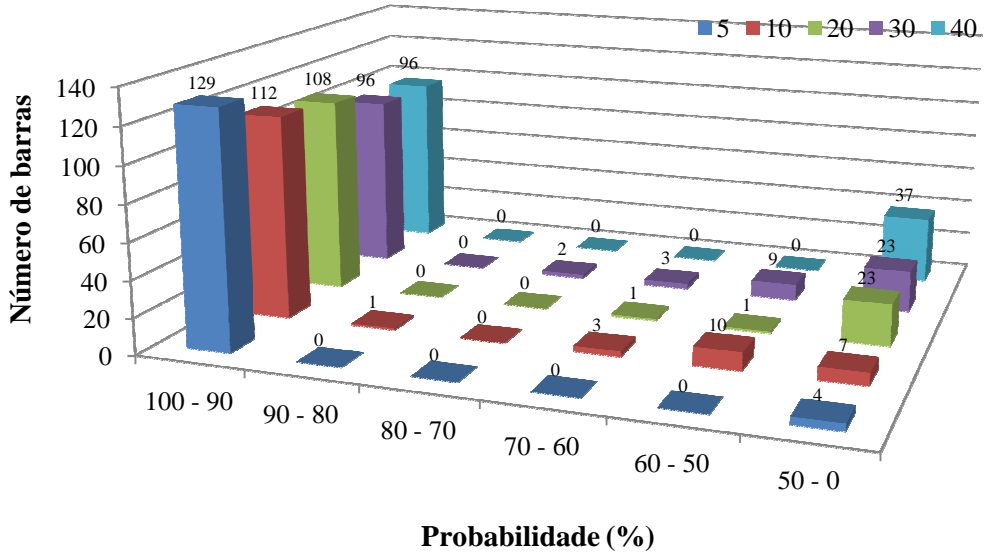
Tabela 21 – Influência da resistência de falta no processo de classificação das barras.

Probabilidade (%)	Resistência Fase-Terra (Ω)				
	5	10	20	30	40
100 - 90	129	112	108	96	96
90 - 80	0	1	0	0	0
80 - 70	0	0	0	2	0
70 - 60	0	3	1	3	0
60 - 50	0	10	1	9	0
50 - 0	4	7	23	23	37
Total	133	133	133	133	133

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 58 pode-se observar mais claramente a influência da resistência de falta através da redução da probabilidade da falta ocorrer na barra em falta, com o aumento do valor da resistência de falta. Isto se deve ao fato de que, com o aumento da resistência de falta, os valores das correntes de curto-circuito diminuem, dificultando o processo de classificação. Esta diminuição das correntes de curto-circuito afeta não somente o processo de classificação, mas também pode afetar a identificação das faltas ou sensibilização dos medidores esparsos de tensão, que podem confundir a falta com uma simples conexão de carga ao sistema, o que é algo natural.

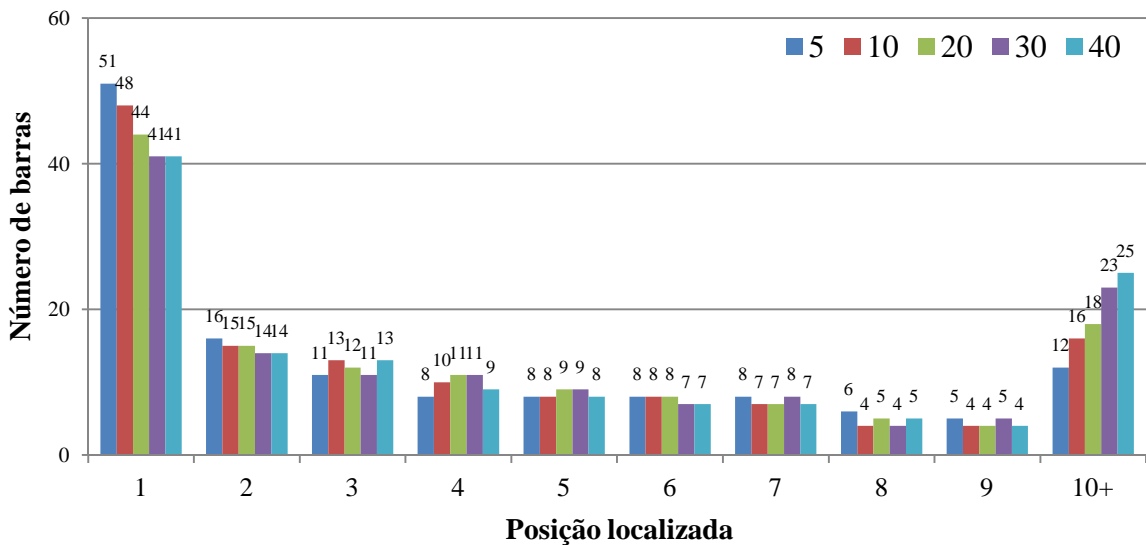
Figura 58 – Influência da resistência na falta fase-terra para uma falta na fase A do sistema.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 59 apresenta-se a variação da posição localizada (classificada) pelo sistema de localização de faltas com o aumento da resistência de falta. Apesar da quantidade de posições localizadas como primeira opção darem uma falsa impressão de baixa eficiência do sistema de localização de faltas por não classificar a maioria das barras na primeira posição, verificou-se que o algoritmo é capaz de identificar uma área provável de incidência da falta com grande eficiência. Considerando que as barras em falta estão nessa área, a maioria das barras pode ser classificada entre 90 e 100% de probabilidade de acerto, conforme apresentado anteriormente na Figura 58.

Figura 59 – Influência da resistência na falta fase-terra em relação à posição localizada.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

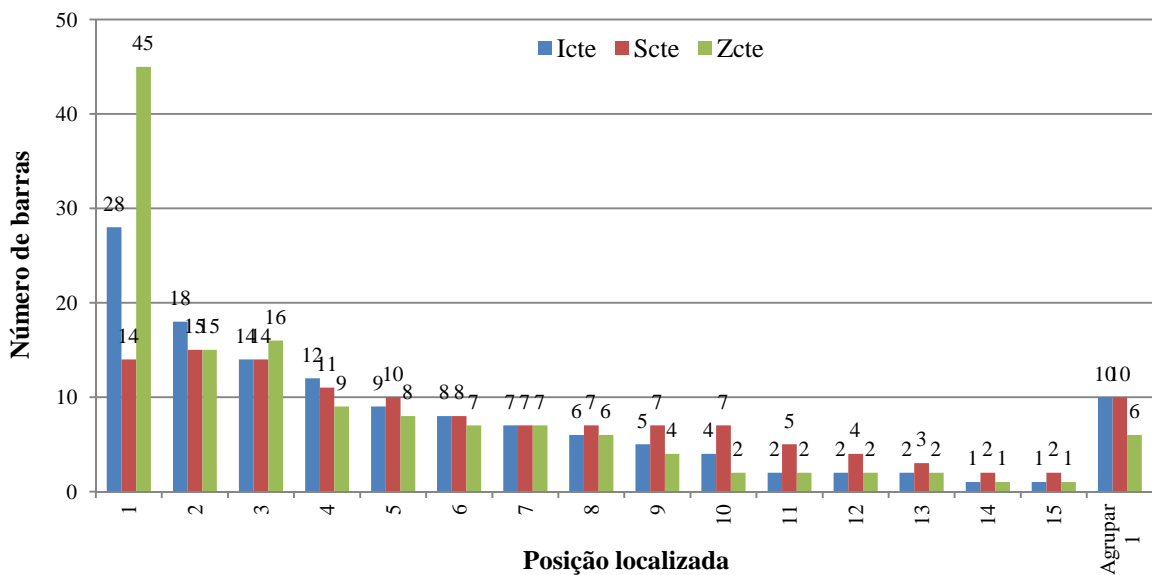
5.2.4 Influência do Modelo de Carga

Conforme mencionado anteriormente, os elementos que compõem a rede elétrica foram representados pelo modelo " π " do ATP (2002), adequado para linhas de distribuição onde o acoplamento entre circuitos deve ser representado. Já para as cargas, optou-se por utilizar o modelo de impedância constante, por motivos de simplificação. No entanto, o algoritmo de localização de faltas foi desenvolvido para trabalhar com cargas polinomiais, ou seja, cargas mistas que podem variar de acordo com as porcentagens de cargas do tipo impedância constante, corrente constante e potência constante, presentes no sistema.

Sendo assim, nesta seção busca-se demonstrar a influência que o modelo de carga exerce no processo de localização de faltas. Os testes apresentados e discutidos a seguir, foram realizados considerando-se um carregamento nominal para os transformadores, tanto nas simulações das faltas quanto no algoritmo de localização de faltas.

Na Figura 60 apresenta-se a influência do modelo de carga em relação à posição localizada pelo algoritmo de localização de faltas para faltas simuladas em todas as barras, considerando a ocorrência destas faltas na fase C do sistema, com resistência de falta fase-terra de $10,0 \Omega$.

Figura 60 – Influência do modelo de carga em relação à posição localizada.

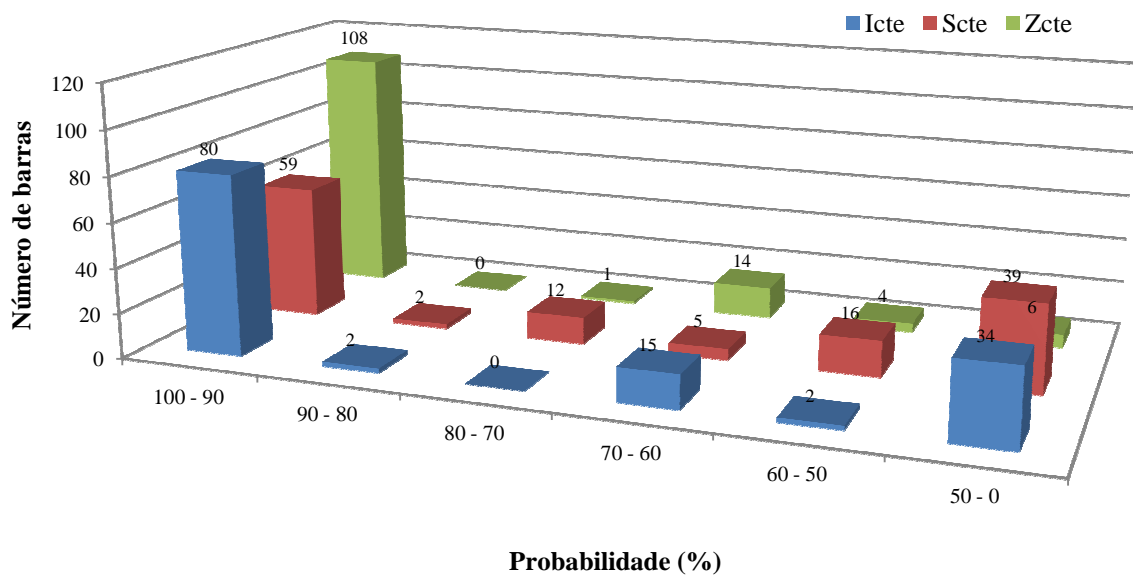


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O uso do modelo de potência constante para as cargas no algoritmo de localização de faltas faz com que as correntes das cargas, equação (2.9), tenham suas magnitudes aumentadas para a condição de falta.

Na Figura 61 pode-se observar mais claramente a influência do modelo de carga através da diminuição da probabilidade da falta ocorrer na barra em falta, com a variação do modelo de carga. Isto se deve ao fato do algoritmo utilizar equações distintas para os diferentes tipos de carga adotados, conforme apresentado no capítulo 2, subseção 2.2.

Figura 61 – Influência do modelo de carga para uma falta de $10,0 \Omega$ na fase C do sistema.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Esse aumento das correntes das cargas durante a falta ocorre porque o valor da tensão nos nós do alimentador é reduzido devido à presença da corrente de curto-circuito, o que afeta claramente o processo de localização de faltas.

Para muitos casos observados durante os testes com algoritmo de localização de faltas proposto, a localização do verdadeiro local da falta não foi exata, porém, mesmo com a variação dos modelos de carga, a região em falta obtida através da nova classificação proposta parece ser bem confiável, permitindo, assim, que as equipes de manutenção sejam direcionadas para a região correta do alimentador onde ocorreu a falta.

5.2.5 Influência do Carregamento dos Transformadores de Distribuição

Nesta seção, busca-se identificar a influência do carregamento dos transformadores de distribuição no algoritmo de localização de faltas desenvolvido neste trabalho. Para isso, foram realizadas diversas simulações considerando três níveis de carregamento distintos, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 – Nível de carregamento dos transformadores de distribuição.

Nível de Carregamento	Média	Desvio Padrão	Variação
Alto	1,0	0,065	$0,8 < \varepsilon < 1,2$
Médio	0,8	0,065	$0,6 < \varepsilon < 1,0$
Baixo	0,6	0,065	$0,4 < \varepsilon < ,08$

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O algoritmo de localização de faltas estima o carregamento de cada transformador baseado na potência complexa medida no nó inicial do alimentador e da potência nominal de cada transformador, como apresentado na Subseção 4.2.5. Porém, os carregamentos reais dos transformadores de distribuição apresentam comportamento estocástico devido às necessidades de cada consumidor, fazendo com que os vários transformadores instalados no alimentador apresentem, no decorrer do tempo, carregamentos distintos de seus valores nominais. Assim, com o propósito de tornar as simulações mais próximas da realidade, os carregamentos dos transformadores foram simulados considerando-se um carregamento aleatório para cada transformador e, para essa finalidade, uma variável aleatória ε com distribuição normal foi selecionada. Portanto, a potência complexa de cada transformador, utilizada nas simulações das faltas através do software ATP é dada pela equação (103).

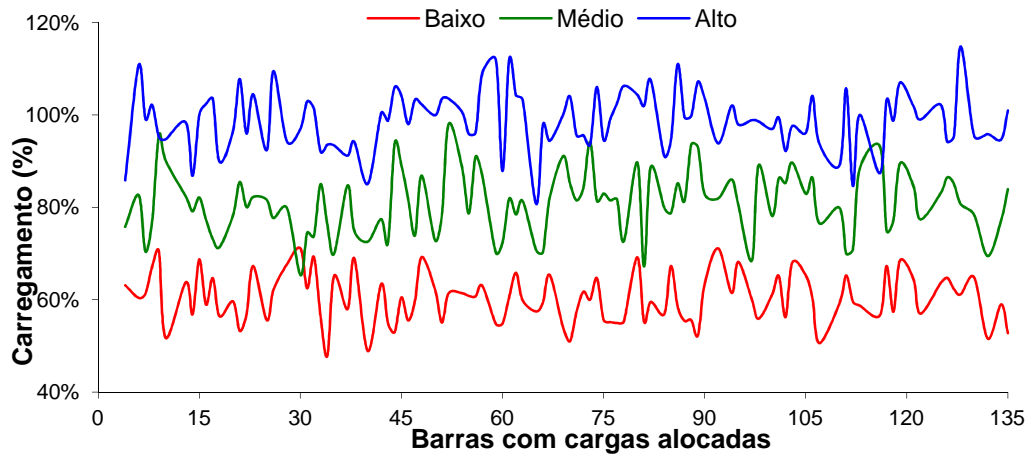
$$S_{ATP\ i} = \varepsilon_i \cdot S_{nom\ i} \cdot (\cos \varphi + j \text{sen } \varphi) \quad (103)$$

Sendo:

- ε_i : variável aleatória de distribuição normal;
- $S_{nom\ i}$: potência nominal do i-ésimo transformador;
- $\cos \varphi$: fator de potência estimado para a subestação.

Na Figura 62 apresenta-se um exemplo desses carregamentos aleatórios simulados através do software ATP.

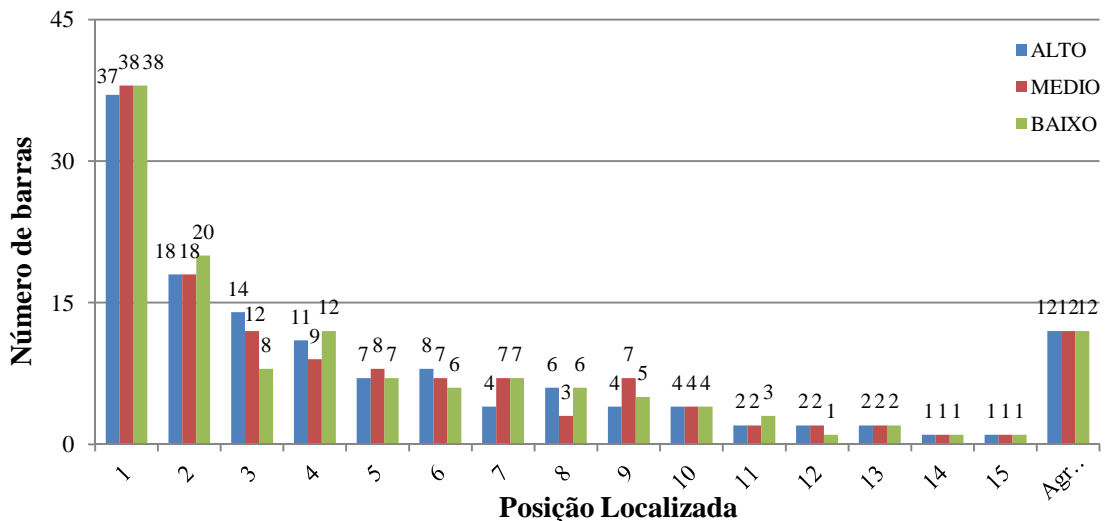
Figura 62 – Exemplo dos níveis de carregamento aleatórios dos transformadores de distribuição.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para cada barra do sistema foi simulada uma falta considerando um carregamento aleatório para cada transformador de distribuição, segundo a Tabela 22. Na Figura 63 apresenta-se a influência dos níveis de carregamento e da aleatoriedade das cargas dos transformadores de distribuição em relação à posição das barras classificadas pelo sistema de localização de faltas durante a ocorrência de faltas monofásicas, com resistência de falta de 10 ohms, ocorridas na fase A.

Figura 63 – Influência do carregamento dos transformadores na posição das barras localizadas.

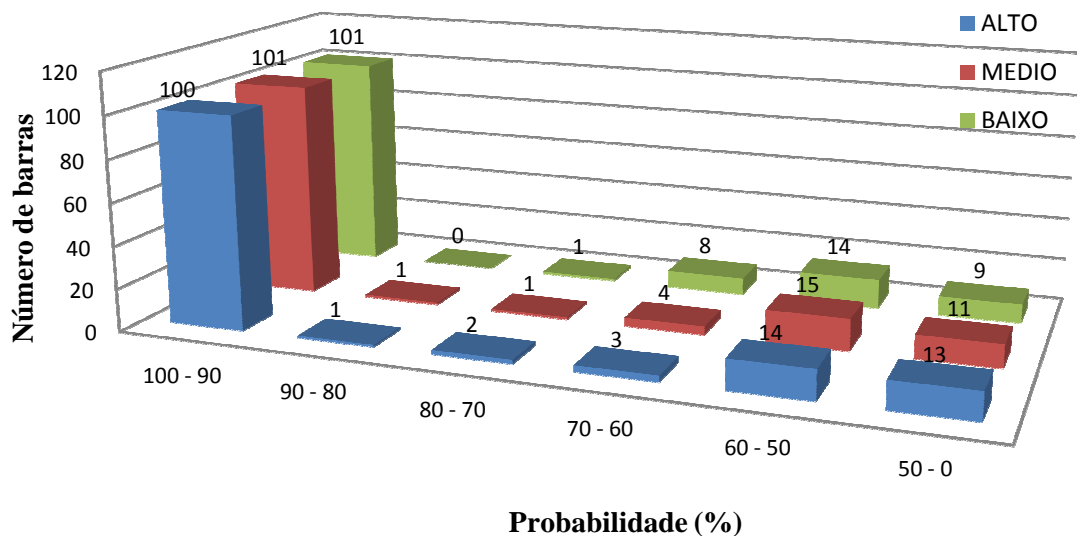


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Verifica-se que a variação do nível de carregamento dos transformadores não exerce grande influência na posição das barras classificadas pelo algoritmo de localização de faltas.

Portanto, a estimativa da potência pré-falta dos transformadores de distribuição, apresentada na Subseção 4.2.5, apresenta-se como uma metodologia de cálculo eficiente e com boa aproximação, não influenciando muito nos resultados alcançados pelo algoritmo de localização de faltas. Esta baixa influência também pode ser observada na Figura 64, na qual se apresenta a influência do carregamento aleatório dos transformadores de distribuição em relação à probabilidade de ocorrência de falta na barra simulada ou não.

Figura 64 – Influência do carregamento dos transformadores na ocorrência de faltas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Porém, comparando-se os resultados observados na Figura 63 e na Figura 64 com os apresentados na Figura 48 e na Figura 49 para faltas monofásicas, com resistência de falta de 10 ohms ocorridas na fase A, na qual as simulações foram realizadas levando-se em consideração o carregamento nominal dos transformadores de distribuição, verifica-se que houve uma diminuição tanto do número de acertos na posição localizada em primeiro lugar, passando de 48 para 38 acertos, quanto na probabilidade de ocorrência de faltas acima de 90%, diminuindo de 112 para 101.

Portanto, conclui-se que o algoritmo de localização é mais influenciado pelo modelo de carga do que pelo nível de carregamento do sistema. Sendo assim, quanto mais correta a estimativa do carregamento dos transformadores de distribuição, melhores serão os resultados fornecidos pelo algoritmo de localização de faltas.

A seguir apresenta-se a influência da geração distribuída no processo de localização de faltas.

5.2.6 Influência da Geração Distribuída

Uns dos tipos mais comuns de geradores distribuídos encontrados atualmente nos sistemas de distribuição são os geradores síncronos que não possuem controle de tensão, correspondendo a pequenos geradores diretamente conectados à rede, fornecendo uma potência constante para a rede elétrica. Portanto, esses geradores podem ser modelados como uma carga do tipo PQ, fornecendo corrente para o sistema ao invés de consumi-la, ou seja, estes geradores distribuídos podem ser vistos como uma fonte de injeção de correntes para o sistema. Assim, considerando-se a presença desses tipos de geradores síncronos na rede, na Tabela 23 apresentam-se alguns dados para os geradores distribuídos utilizados nas simulações apresentadas a seguir.

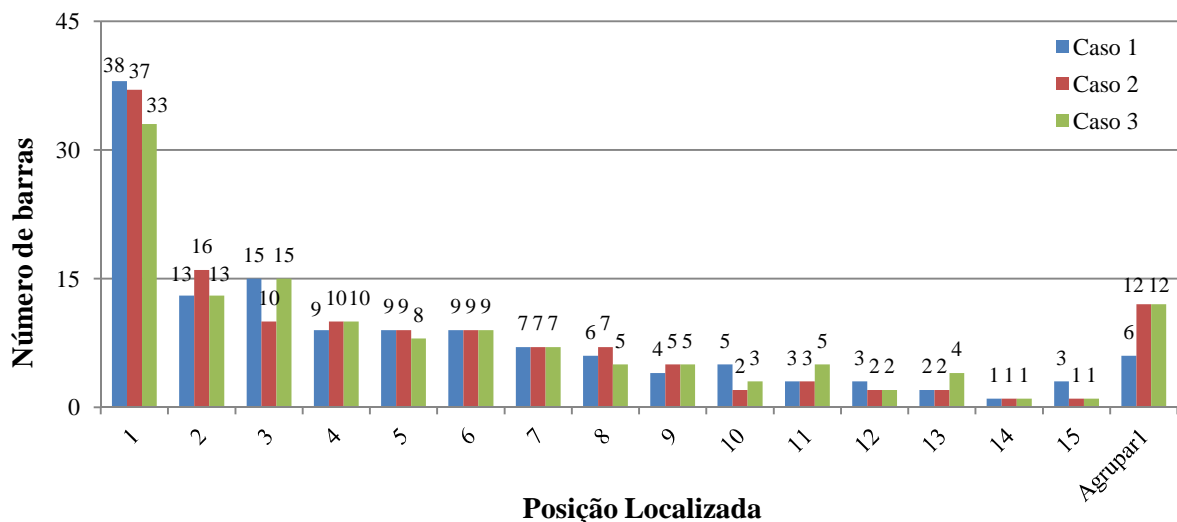
Tabela 23 – Influência da penetração da geração distribuída no processo de localização de faltas.

Geração Distribuída:			Caso 1		Caso 2		Caso 3	
Gerador	Controle	Barra	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
Síncrono	PQ	20	200	50	400	100	600	150
Síncrono	PQ	45	150	35	300	75	400	100
Síncrono	PQ	55	200	50	400	100	600	150
Síncrono	PQ	134	150	35	300	75	400	100
MVA			0,720		1,443		2,062	
% MVA TOTAL			10,2%		20,4%		29,2%	

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 65 apresenta-se a influência da penetração da geração distribuída na posição das barras localizadas pelo algoritmo de localização de faltas para os três casos apresentados na Tabela 23, para faltas bifásicas entre as fases B e C, simuladas considerando-se uma resistência de falta entre fases de 1,0 Ω .

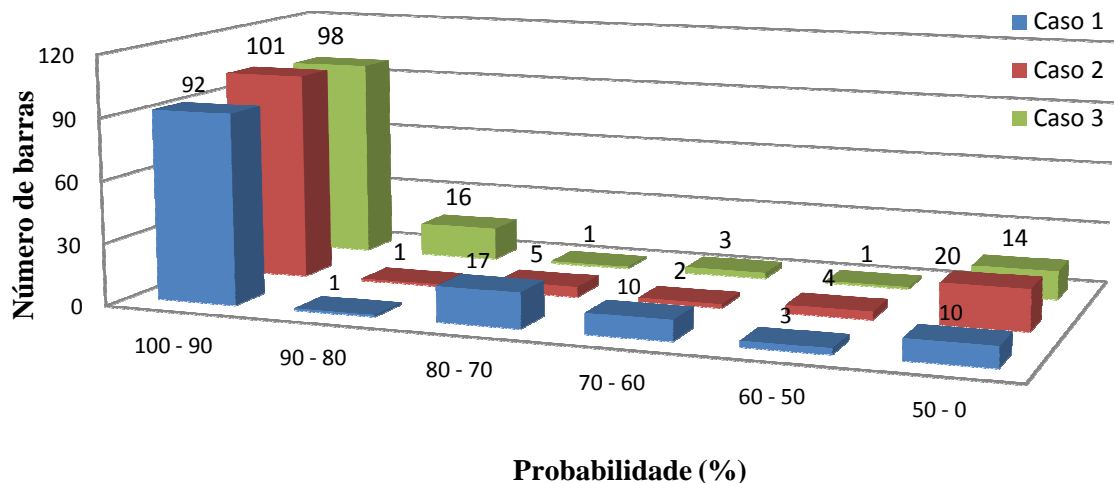
Figura 65 – Influência da penetração de GD na posição das barras localizadas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 66 apresenta-se a influência da penetração de geração distribuída na probabilidade de ocorrência de falta na barra simulada, na qual se verifica que não ocorre grande variação na classificação das probabilidades de falta, o que indica uma boa tolerância à penetração de geração distribuída, ou seja, o algoritmo não sofre grande influência com o acréscimo de geradores distribuídos à rede.

Figura 66 – Influência da penetração de GD na probabilidade de ocorrência de falta.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A seguir, apresentam-se alguns resultados no qual se buscou simular a operação de um sistema real, levando-se em consideração a influência de todos os itens anteriormente apresentados nas subseções 5.2.3 a 5.2.6.

5.2.7 Simulando um Sistema Real

Para simular a operação de um sistema real foram consideradas algumas variáveis aleatórias, utilizadas para simular um processo estocástico, o qual representa uma sequência de variáveis aleatórias indexadas no tempo com uma estrutura de correlação bem definida. Em outras palavras, um processo estocástico é uma sequência de funções mensuráveis, ou seja, um conjunto de variáveis aleatórias X_i definidas num espaço de probabilidade (Ω, P) que tomam valores num espaço de funções F_j . Sendo assim, para o carregamento dos transformadores três níveis de carregamento distintos foram utilizados, conforme Tabela 22 apresentada na subseção 5.2.5. Na Tabela 24 apresentam-se as demais variáveis aleatórias consideradas nas simulações das faltas através do software ATP, com suas respectivas faixas de variações.

Tabela 24 – Variáveis estocásticas consideradas nas simulações.

Variável	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Faixa de Variação
Barra em Falta	Uniforme			2 a 134
Fase em falta	Uniforme			A, B ou C
Tipo de falta	Normal	0	1	5% trifásicas 10% bifásicas 85% monofásicas
Resistência fase-terra	Normal	25	4,854	10 a 40
Resistência entre fases	Normal	0,5	0,129	0,1 a 0,9
Carregamento dos Transformadores	Uniforme			alto, médio ou baixo

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Foram simuladas 5000 faltas para o sistema de distribuição com e sem a presença de geração distribuída. Os valores médios dos resultados obtidos através das simulações estocásticas são apresentados na Tabela 25, na qual se pode observar que tanto a médias das posições localizadas quanto a média da probabilidade de ocorrência das faltas nas barras não se alteram, o que indica uma boa insensibilidade em relação à penetração da geração distribuída e em relação ao carregamento dos transformadores.

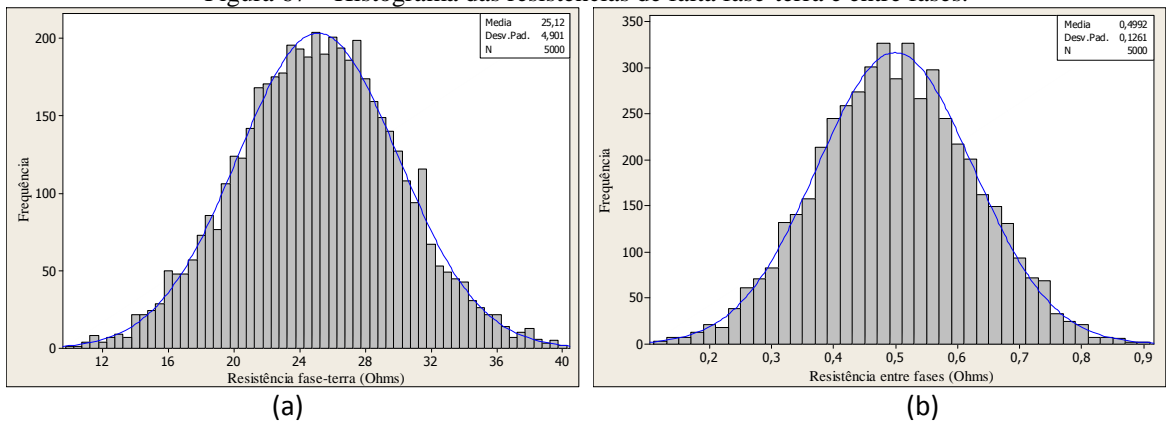
Tabela 25 – Valores médios dos resultado das simulações estocásticas.

Geração Distribuída	Carregamento	Resistência entre fases	Resistência fase-terra	Posição	Probabilidade
Não	Alto	0,50	25,13	5	89,66
	Médio	0,50	25,19	6	89,61
	Baixo	0,50	25,04	5	91,03
Sim	Alto	0,51	24,85	8	79,52
	Médio	0,50	25,15	9	78,16
	Baixo	0,50	24,97	9	79,55

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 67 (a) estão representados alguns valores das resistências de falta fase-terra e na Figura 67 (b) alguns valores das resistências de falta entre fases que foram utilizadas nas simulações das faltas no software ATP para o sistema sem geração distribuída, sendo geradas por distribuição normal, conforme Tabela 24.

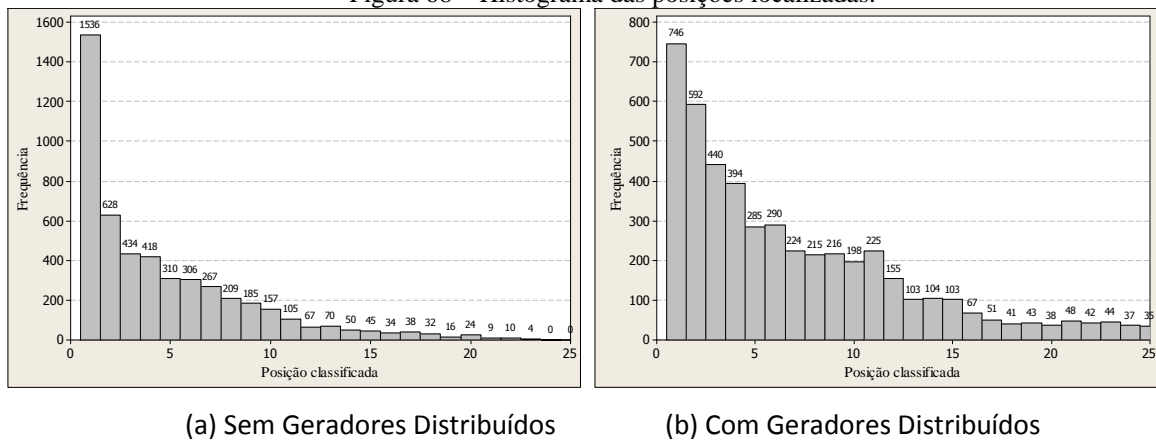
Figura 67 – Histograma das resistências de falta fase-terra e entre fases.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A quantidade de barras localizadas por posição classificada pelo algoritmo de localização de faltas está representada nos histogramas da Figura 68, na qual se pode observar claramente a influência da geração distribuída nos resultados fornecidos pelo sistema de localização de faltas.

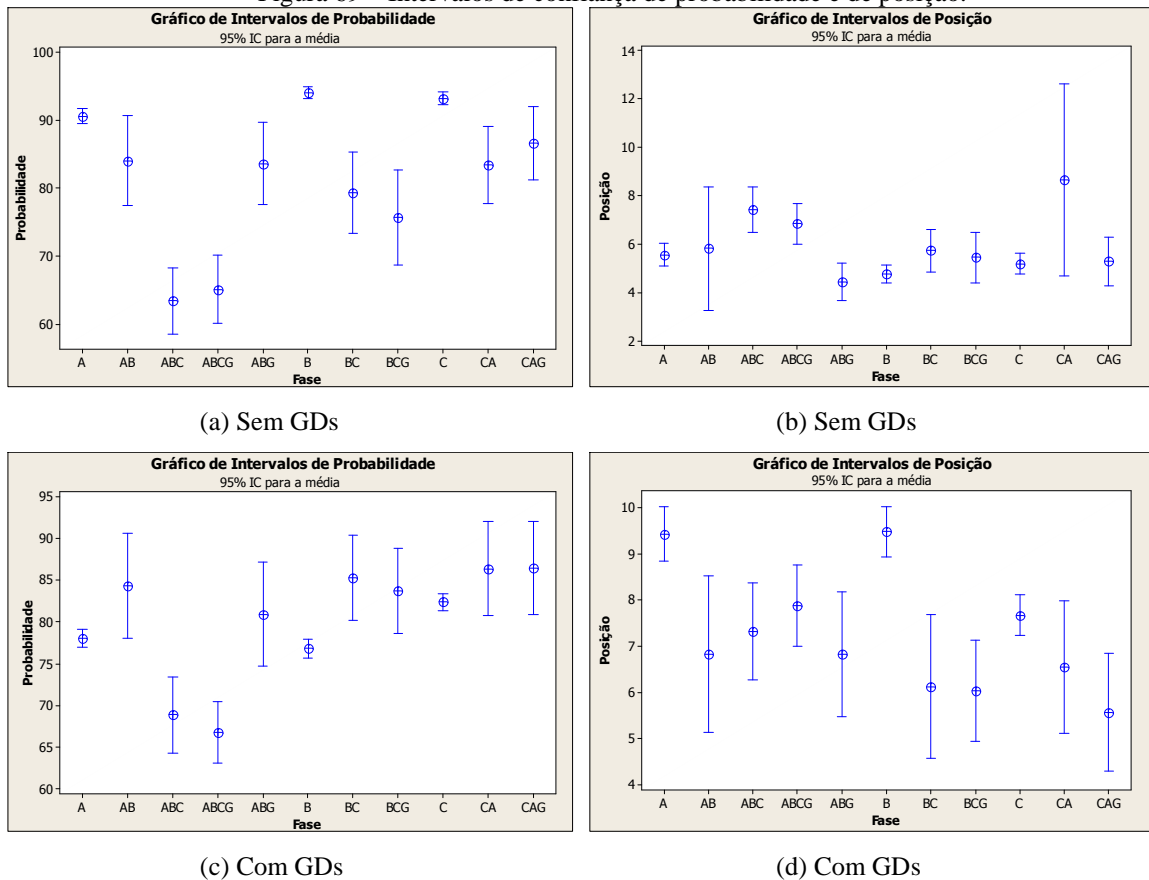
Figura 68 – Histograma das posições localizadas.



Apesar do número de barras localizadas na primeira opção ter diminuído sensivelmente, a área representada pelas 15 primeiras posições não sofreu grande alteração. Sendo assim, houve uma diluição da classificação das barras da primeira posição para as posições adjacentes e, conforme pode ser observado na Tabela 25, a posição média encontrada para o sistema sem geração distribuída passou da posição 6 para a posição 9 quando se adiciona geração distribuída ao sistema.

Na Figura 69 apresentam-se os gráficos para os intervalos de confiança das probabilidades de ocorrência de faltas e das posições classificadas pelo algoritmo de localização de faltas, para cada tipo de falta simulada.

Figura 69 – Intervalos de confiança de probabilidade e de posição.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

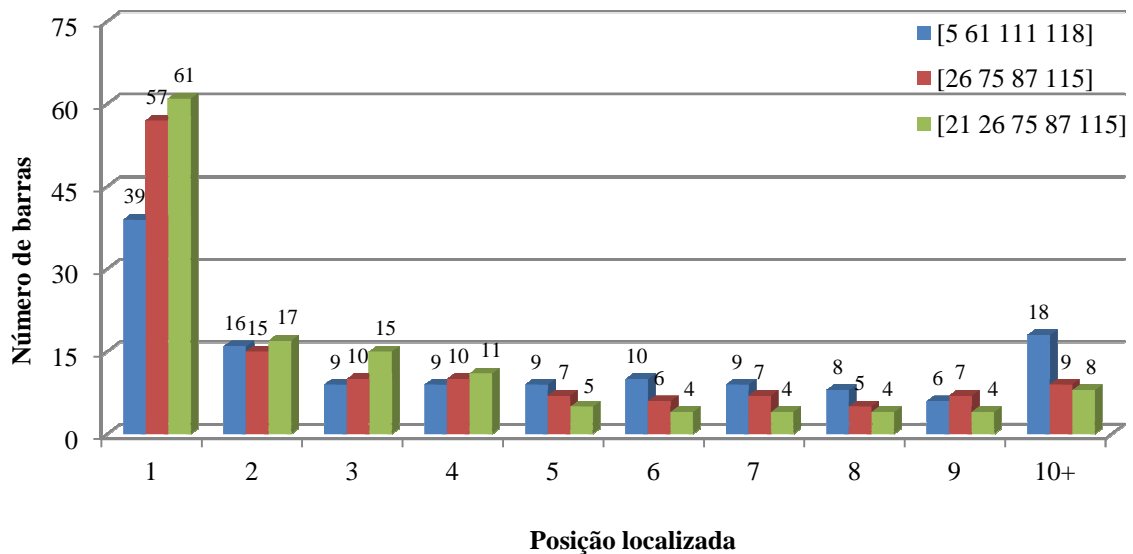
Através da comparação destes gráficos pode-se notar a sensibilidade do algoritmo em relação aos tipos de faltas quando a geração distribuída é adicionada ao sistema. O “alvo” que aparece em cada figura representa a média aritmética para cada tipo de falta e as linhas representam suas respectivas variações. Sendo assim, observando-se os gráficos dos intervalos de confiança de probabilidade (a) e (c), com e sem GDs, nota-se claramente a piora nas classificações das faltas monofásicas e uma melhora na classificação das faltas bifásicas. Já em relação aos gráficos dos intervalos de confiança das posições localizadas (b) e (d) nota-se um aumento tanto na média como na variação da posição localizada quando da inserção de geração distribuída ao sistema, porém, esse aumento não chega a ser tão significativo, pois a maioria das barras continua a ser localizada entre as 10 primeiras posições.

Uma forma de se melhorar o desempenho do algoritmo de localização de faltas é através do aumento do número de medidores instalados no sistema de distribuição ou através da alocação otimizada dos medidores atuais. Tanto a posição quanto o número de medidores disponíveis também afetam a eficiência do algoritmo de localização de faltas.

5.2.8 Influência da Posição e do Número de Medidores Instalados

Sabe-se, a princípio, que a quantidade de medidores empregados no processo de localização de faltas e o local onde esses medidores são instalados influenciam diretamente na precisão do algoritmo proposto. Durante os testes e simulações realizados, constatou-se que o acréscimo de um medidor na barra 21, ou em suas proximidades, melhora o desempenho do sistema de localização, diminuindo o erro de localização e a área de busca, conforme pode se observar na Figura 70. Esta análise é feita para faltas simuladas na fase B, com resistência de falta de $10,0 \Omega$, carregamento nominal dos transformadores e cargas modeladas como sendo de impedância constante. Na Figura 70 são apresentados também os resultados obtidos para a configuração proposta por Pereira (2007), a título de comparação, visto que esta configuração também é considerada uma configuração otimizada, encontrada através da utilização de um algoritmo genético. As posições encontradas por Pereira como ótimos locais para a instalação dos medidores de energia foram nas barras 5, 61, 111 e 118.

Figura 70 – Influência da posição e número de medidores instalados no sistema.

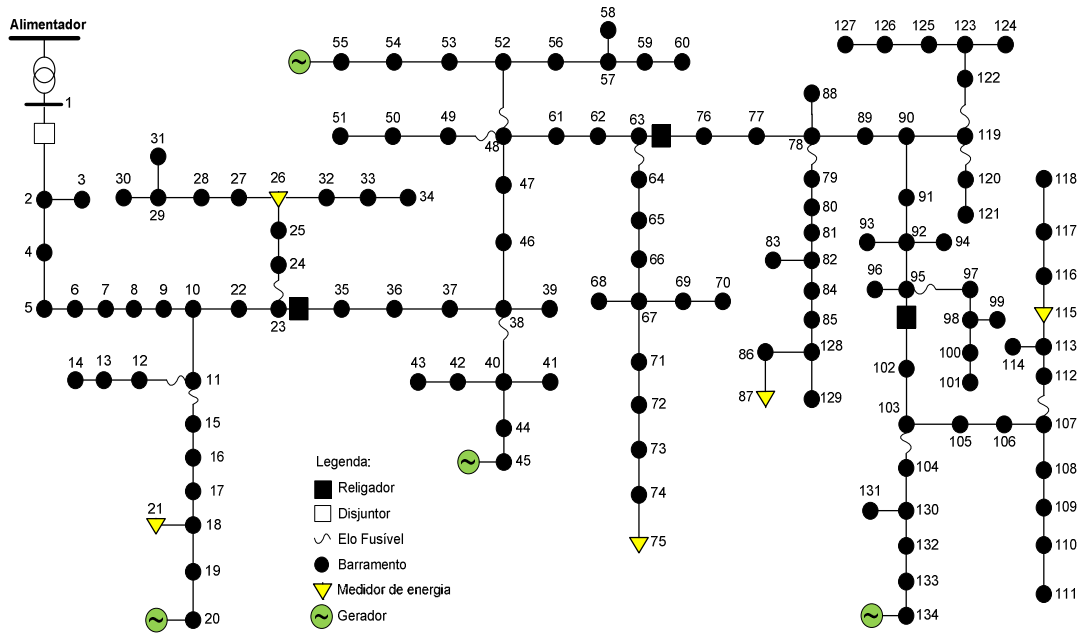


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

É possível verificar a sensível melhora nos resultados alcançados pelo algoritmo de localização de faltas ao se adicionar mais um medidor de energia no sistema.

Na Figura 71 apresenta-se a nova configuração para os 5 medidores de tensão, com a presença de geração distribuída conectada diretamente ao sistema de distribuição.

Figura 71 - Sistema de distribuição trifásico com a presença de geração distribuída.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Considerando a disponibilidade de apenas 4 medidores as alocações apresentadas na Figura 41 são consideradas alocações otimizadas para a rede radial mas, ao considerar a presença de geradores distribuídos e se aumentar a quantidade de medidores disponíveis, esta configuração deixa de ser considerada uma configuração otimizada, sendo necessário executar o processo de busca dos pontos ótimos novamente. Porém, como as análises de alocação otimizada não fazem parte deste trabalho, fica aqui apenas esta constatação como uma proposta pra trabalhos futuros, visto que a nova configuração com 5 medidores deixou de ser uma configuração otimizada.

6 Conclusões

Neste trabalho foram desenvolvidos algoritmos inteligentes para localizar faltas e monitorar a qualidade da energia em redes de distribuição de energia elétrica. Os algoritmos desenvolvidos para monitorar a qualidade de energia mostraram ser capazes de detectar, classificar e localizar no tempo e espaço os eventos de qualidade de energia, fornecendo bons resultados tanto para a identificação dos tipos de curtos-circuitos, através das análises das oscilografias das correntes trifásicas, quanto para a classificação dos eventos de qualidade de energia referentes às tensões, através das análises das oscilografias das tensões trifásicas.

No caso do algoritmo de detecção e classificação de distúrbios de qualidade de energia a técnica de AMR foi muito bem explorada na sua capacidade de extrair características únicas para os diferentes tipos de distúrbios, distinguindo o conteúdo de frequência existente em cada tipo, possibilitando, assim, o desenvolvimento de um algoritmo capaz de detectar, localizar no tempo e classificar automaticamente os diferentes tipos de distúrbios de tensão e curtos-circuitos analisados. Na análise multirresolução o sinal de entrada é decomposto em duas partes, as quais representam uma versão de detalhes (correspondente às altas frequências do sinal) e uma versão de aproximação (correspondente às baixas frequências do sinal). A versão de aproximação é novamente decomposta obtendo-se novos sinais de detalhes e aproximações e assim sucessivamente. Desta forma, os distúrbios puderam ser detectados e localizados no tempo em função do seu conteúdo espectral de frequência. Estas informações fornecem características únicas, pertinentes a cada tipo de distúrbio, permitindo classificá-los com elevado grau de precisão.

A detecção da falta é feita a partir de análises estatísticas dos 4 primeiros níveis de detalhes dos sinais de corrente medidos na subestação. Os resultados do módulo de detecção e localização no tempo mostrou-se muito eficiente, visto que houve a indicação do tempo inicial e final do distúrbio para a maioria dos casos de afundamento, elevação e interrupção de energia. Em alguns casos, quando os valores simulados foram muito pequenos, o módulo de detecção não identificou a falta por considerar que o acréscimo ou redução da forma de onda poderia representar uma carga sendo conectada ao sistema elétrico.

O módulo de análise da qualidade de energia, responsável pela avaliação e classificação dos eventos registrados nas formas de onda das tensões, apresentou bons resultados, em torno de 93% de acertos, dependendo do treinamento e forma de onda analisada, conforme pode ser observado nas Tabelas 13, 14 e 15. O treinamento continuado das RNAs ARTMAP-Fuzzy, no qual apenas as amostras classificadas erroneamente são apresentadas à rede, sem que haja a necessidade de passar por um retreinamento completo com todos os dados de medições já existentes na base de dados de treinamento da rede, mostrou ser uma ferramenta computacional altamente eficiente, rápida, flexível e adaptável a qualquer sistema de distribuição de energia.

Quanto ao módulo de análises de curto-circuito, as oscilografias das tensões e correntes para a SE foram simuladas através do software ATP, aplicando-se situações de faltas em diversos pontos do sistema, com as inserções dessas faltas apresentando ângulos de incidência variados e diversos valores de resistências de falta. Após o treinamento dessas 3 RNAs com as 17.556 simulações realizadas, a fim de se verificar a eficiência do processo de classificação, foram analisadas 11.704 simulações considerando outros ângulos de incidência e, através dessas análises, pode-se observar claramente o alto desempenho alcançado pelas três RNAs, sendo que o erro apresentado por elas foi praticamente o mesmo, observados apenas em relação à presença de terra ou não para faltas classificadas como trifásicas. Este erro torna-se praticamente irrelevante quando relacionado ao algoritmo de localização de faltas, que depende única e exclusivamente das fases envolvidas no defeito e não da presença ou não de aterramento.

Em relação à técnica de localização de faltas proposta neste trabalho, ela se aplica a alimentadores trifásicos com cargas desequilibradas, que podem possuir ramais laterais trifásicos, bifásicos ou monofásicos. As equações da rede que compõem esta técnica foram desenvolvidas com base nos métodos de fluxo de potência do tipo varredura (backward/forward sweep), o que a torna uma ferramenta eficiente e de baixo esforço computacional. Em seu desenvolvimento, considera-se que exista a disponibilidade de medições de tensões e correntes na SE e também medições esparsas de tensão em alguns pontos ao longo do alimentador. Esta técnica apresenta algumas vantagens quando comparada com as técnicas convencionais para localização de faltas que utilizam o deslocamento do local da falta na rede. Nela, eliminam-se dos possíveis locais de falta os pontos que estão em ramais laterais geograficamente distantes do verdadeiro local da falta e que poderiam ser indicados pelos métodos convencionais.

A presença de malhas e geração distribuída é considerada nos cálculos de fluxos de potência e análises de curto-circuito e as faltas ocorridas no sistema são modeladas como injeções de correntes nas barras, tornando, assim, desnecessário o cálculo da resistência de falta, que pode ser estimada no final do processo através das correntes e tensões encontradas no final do processo de localização, após sua convergência.

Portanto, analisando de uma maneira geral todos os resultados obtidos, verifica-se a eficiência e versatilidade dos algoritmos inteligentes desenvolvidos para localizar faltas e monitorar a qualidade da energia em redes de distribuição de energia elétrica, os quais, quando utilizados em conjunto como aqui apresentados, fornecem um ótimo diagnóstico do estado operativo da rede de distribuição, que vêm contribuir de forma significativa para as análises de planejamento, controle e operação dos sistemas de distribuição, realizadas pelas concessionárias de energia.

6.1 Trabalhos Futuros

No decorrer deste trabalho, foram identificadas algumas possibilidades de desenvolvimento de novos projetos relacionados com as metodologias fundamentadas no estudo dos eventos de qualidade de energia e localização de faltas para as redes de distribuição de energia elétrica. Algumas dessas oportunidades estão relacionadas abaixo:

- Desenvolver um software que contemple todos esses módulos em um único programa, desenvolvendo uma interface gráfica amigável, de fácil manipulação e que apresente os relatórios de ocorrência com os gráficos das oscilografias registradas e eventos de qualidade de energia analisados;
- Como o número de medidores é um fator importante para o bom desempenho do algoritmo de localização de faltas, quanto maior o número de medidores de tensão disponíveis melhores serão os resultados obtidos e, dependendo dos recursos financeiros disponibilizados pelas empresas, esse número pode ser bastante limitado. Sendo assim, é importante desenvolver um novo algoritmo para a alocação otimizada dos medidores de qualidade de energia que serão utilizados no processo de localização de faltas;

- Validar toda a lógica desenvolvida frente às medições reais registradas em campo;
- Durante o desenvolvimento deste trabalho, identificou-se também a possibilidade de desenvolver um software de simulação de faltas para gerar as formas de onda a serem analisadas, baseados nos cálculos realizados pelo ATP. Este software poderá ser de grande auxílio para outros estudantes, que poderão realizar suas simulações sem a necessidade de saber manipular o ATPDraw, o qual necessita que a rede seja modelada através de uma interface gráfica e que leva tempo para ser implementado. Além disso, os resultados fornecidos por este software serão totalmente baseados em um programa mundialmente conhecido e reconhecido, o que validaria ainda mais os resultados, testes e formas de onda simuladas neste novo software;
- Realizar maiores estudos relativos às RNAs, que mostraram ser uma ótima ferramenta de análise e classificação de padrões. Alguns detalhes quanto à manipulação dos parâmetros da rede, tempo de treinamento e relevância do treinamento continuado da rede podem ser mais bem discutidos, visto que, na literatura especializada sobre o assunto, não se encontra facilmente esses detalhes;
- Verificar a alocação otimizada dos medidores esparsos de tensão para uma quantidade maior de medidores, tentando encontrar, além de sua posição ótima, o número ótimo de medidores. Para isso, a restrição do número de medidores disponíveis para serem alocados no sistema deve ser relaxada, porém, levando-se em consideração seus custos de aquisição e instalação de forma ponderada no cálculo da função objetivo do problema.
- Utilizar técnicas de processamento paralelo para melhorar o tempo de processamento do algoritmo de localização de faltas, visto que as análises de curtos-circuitos, simuladas para cada barra candidata do sistema, são realizadas independentemente umas das outras. Portanto, nesta etapa da execução do algoritmo de localização de faltas, verificou-se a possibilidade de se aplicar o processamento paralelo para executar várias análises de curto-circuito ao mesmo tempo, diminuindo o tempo total de processamento.

REFERÊNCIAS

ABDEL-AKHER, M.; MOHAMED, K.; ABDUL, A. H. R. Improved three-phase power flow methods using sequence components. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 20, n. 3, p. 1389-1396, August 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente. Resolução n. 505, de 26 de novembro de 2001. **Diário Oficial da União**: República Federativa do Brasil: Poder Legislativo, 16 jan. 2004. Col. 1, p. 43. Disponível em <www.aneel.gov.br/cedoc/res2001505.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2012.

BERMAN, A.; XU, W. Analysis of faulted power systems by phase coordinates. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 13, n. 2, p. 587-595, April 1998.

BISCARO, A. A. P. **Modelo estocástico de programação matemática de alocação de medidores de tensão em alimentadores radiais de distribuição de energia elétrica para localização de faltas e monitoramento do perfil de tensão**. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2009.

BOLLEN, M. H. J. **Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions**. New York: Willey-IEEE, 2000, 543 p.

BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Y. H. **Signal processing of power quality disturbances**. Massachusetts: Willey-IEEE, 2006. 861 p.

BURRUS, C. S.; GOPINATH, R. A.; GUO, H. **Introduction to wavelets and wavelet transforms : a primer**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. 268 p.

CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S. A massively parallel architecture for a self-organizing neural pattern recognition machine. **Computer vision, graphics and image processing**, San Diego, v. 37, n. 1, p. 54-115, January 1987a.

CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S. ART-2: self-organization of stable category recognition codes for analog input patterns. **Applied optics**, Washington, v. 26, n. 23, p. 77-88, December 1987b.

CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S. ART-3: hierarchical search using chemical transmitters in self-organizing pattern recognition architectures. **Neural networks**, Boston, v. 3, n. 2, p. 129-152, March 1990.

CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S.; REYNOLDS, J. H. Artmap: supervised real-time learning and classification of nonstationary data by a self-organizing neural network. **Neural Networks for Ocean Engineering**, Boston, v. 4, n. 5, p. 565-588, August 1991a.

CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S.; REYNOLDS, J. H. Fuzzy ART: fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system. **Neural networks**, Boston, v. 4, n. 6, p. 759-771, June 1991b.

CARPENTER, G. A. et al. Fuzzy ARTMAP: a neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps. **IEEE Transactions on Neural Networks**, Piscataway, v. 3, n. 5, p. 698–713, September 1992.

CESPEDES, R. G. New method for the analysis of distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 5, n. 1, p. 391-396, January 1990.

CHEN, B. K. et al. Hybrid three phase load flow. **IEEE Generation, Transmission and Distribution**, New York, v. 137, n. 3, p. 177-185, May 1990.

CHEN, T. H. et al. Distribution system short circuit analysis: a rigid approach. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 7, n. 1, p. 444-450, February 1992.

CHENG, C. S.; SHIRMOHAMMADI, D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v.10, n.2, p. 671 – 679, May 1995.

COMITE ARGENTINO DE USUÁRIOS DEL EMTP/ATP. ATP rulebook. **Revista Iberoamericana del ATP**, Argentina, v. 3, n. 4, 2002, 700 p.

COOLEY, J. W.; TIKEY, J. W. An algorithm for machine calculation of complex Fourier series. In: **Mathematics of Computation**, Providence, v. 19, n. 90, p. 297-301, April 1965.

DAS, R. **Determining the locations of faults in distribution systems**. 1998. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de Saskatchewan, Saskatoon, 1998.

DAS, B. Fuzzy logic-based fault-type identification in unbalanced radial power distribution system. In: **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 21, n. 1, p. 278–285, January 2006.

DAUBECHIES, I. **Ten lectures on wavelets**, Philadelphia: SIAM, 1992, 369 p.

DECANINI, J. G. M. S. **Detecção, classificação e localização de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando sistemas inteligentes**. 2012. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

DECANINI, J. G. M. S. **Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando lógica nebulosa**. 2007. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

DECANINI, J. G. M. S. et al. Detection and classification of voltage disturbances using a fuzzy-ARTMAP-wavelet network. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 81, n. 12, p. 2057–2065, 2011a.

DECANINI, J. G. M. S. et al. Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando sistemas inteligentes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL, 10., 2011, Fortaleza. **Anais...** Rio de Janeiro: SBIC, 2011b. p. 1–4.

DECANINI, J. G. M. S.; TONELLI-NETO, M. S.; MINUSSI, C. R. Robust fault diagnosis in power distribution systems based on fuzzy artmap neural network-aided evidence theory, In: **IET Generation, Transmission & Distribution**, New Jersey, v. 6, n. 11, p. 1112-1120, July 2012.

DIAZ, H. R.; LOPEZ, M. T. Fault location techniques for electrical distribution networks: a literature survey, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND ENERGY SYSTEMS - IASTED, 50., 2005, Benalmádena. **Proceeding...** Spain: [s.n.], 2005. p. 311-318.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. New York: McGraw-Hill, 1996, 521 p.

EMBREE, P. M.; DANIELI, D. **C++ algorithm for digital signal processing**: upper saddle River: Prentice Hall, 1999, p. 331-402.

GIRGIS, A. A.; FALLON, C. M.; LUBKEMAN, D. L. A fault location technique for rural distribution feeders. **IEEE Transaction on Industry Applications**, New York, v. 29, n. 6, p. 1170-1175, November 1993.

GROSSBERG, S. Adaptive pattern classification and universal recoding: part I - parallel development and coding of neural feature detectors. **Biological Cybernetics**, Boston, v. 23, n. 3, p. 121-134, 1976a.

GROSSBERG, S. Adaptive pattern classification and universal recoding: *part II (feedback, expectation, olfaction, and illusions)*. **Biological Cybernetics**, Boston, v. 23, n. 4, p. 187-202, 1976b.

HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation**. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 842 p.

HE, H.; STARZYK, J. A. A self-organizing learning array system for power quality classification based on wavelet transform. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 21, n. 1, p. 286-295, January, 2006.

HEIDEMAN, M. T.; JOHSON, D. H.; BURRUS, C. S. Gauss and the history of the fast fourier transform. **IEEE ASSP Magazine**, Piscataway, v. 1, n. 4, p. 14-21, October 1984.

HOPFIELD, J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 79, n. 1, p. 2554-2558, April 1982.

IEEE STANDARDS ASSOCIATION. **IEEE Std. 11590-2009**: IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. New York, 2009. 81 p.

IEEE STANDARDS ASSOCIATION. **IEEE Std. 1250-2011**: IEEE guide for identifying and improving voltage quality in power systems. New York, 2011. 55 p.

KERSTING, W. H. Radial distribution test feeders. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 6, n. 3, p. 975-985, August 1991.

KEZUNOVIC, M. Intelligent applications in substations: disturbance analysis. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2., 2004, Denver. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2004. v. 1, p. 719-723.

KEZUNOVIC, M. Smart fault location for smart grids. **IEEE Transactions on Smart Grids**, New York, v. 2, n. 1, p. 11-22, March 2011.

KIM, C. H.; AGGARWAL, R. Wavelet transforms in power systems - part I - general introduction to the wavelet transforms. **Power Engineering Journal**, New York, v. 14, n. 2, p. 81-87, April 2000.

KIM, C. H.; AGGARWAL, R. Wavelet transforms in power systems - Part II – examples of application to actual power system transients. **Power Engineering Journal**, New York, v. 15, n. 4, p. 193-202, August 2001.

KOHONEN, T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. **Biological Cybernetics**, Boston, v. 43, n. 1, p. 59-69, 1982.

LEE, C.; SHEN, Y. Optimal feature selection for power-quality disturbances classification. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 26, n. 4, p. 2342 - 2351, October 2011.

LEHTONEN, M.; PETTISALLO, S.; ETULA, J. H. Computational fault location for electrical distribution networks. In: POWER SYSTEM MONITORING AND CONTROL CONFERENCE, 3., 1991, Londres. **Proceedings...** Londres: [s.n.], 1991. p. 38-43.

LOPES, M. L. M. **Desenvolvimento de redes neurais para previsão de cargas elétricas de sistemas de energia elétrica**. 2005. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

LUO, G. X.; SEMLYEN, A. Efficient load flow for large weakly meshed networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 5, n. 4, p. 309-1316, November 1990.

MAHANTY, R. N.; DUTTA GUPTA, P. B. A fuzzy logic based fault classification approach using current samples only. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 77, n. 6-7, p. 501-507, July 2007.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **Bulletin of Mathematical Biophysics**, Dordrecht ,v. 5, n. 4, p. 115-133, 1943.

MENESES, C. A. P. **Desenvolvimento de técnicas e modelos matemáticos para solução do problema de planejamento da expansão e operação de sistemas de distribuição de energia elétrica com geradores distribuídos**. 2012. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

MINSKY, M.; PAPERT, S. **Perceptrons**: an introduction to computational geometry. Cambridge: MIT Press, 1969, 308 p.

MORA-FLOREZ, J.; MELENDEZ, J.; CARRILLO-CAICEDO, G. Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems, **Electric Power System Research**, New York, v. 78, n. 4, p. 657-666, April 2008.

NOVOSEL, D.; HART, D.; Hu, Y.; MYLLYMAKI, J. **System for locating fault and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads**. Int. CI.⁶ H02H 3/26. US 5,839,093. 31 dez. 1996, 17 nov. 1998. United States Patent.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-time signal processing**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. 870 p.

PEÑUELA, C. A.; GRANADA, M.; MANTOVANI, J. R. S. Ferramentas computacionais para o planejamento de redes de distribuição desbalanceadas considerando a geração distribuída. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, 18., 2010, Bonito. **Anais...** Campinas: SBA, 2010. p. 2419 - 2424.

PEREIRA, R. A. F. **Localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica usando medições esparsas de tensão**. 2007. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

PEREIRA, R. A. F. et al. Improved fault location on distribution feeders based on matching during-fault voltage sags. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 24, n. 2, p. 852-862, April 2009a.

PEREIRA, R. A. F. et al. Fault location algorithm for primary distribution feeders based on voltage sags. **International Journal of Innovations in Energy Systems and Power**, Glasgow, v. 4, n. 1, p. 1-8, April 2009b.

PEREIRA, R. A. F.; KEZUNOVIC, M.; MANTOVANI, J. R. S. Improved fault location on distribution feeders based on matching during-fault voltage sags. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 24, n. 2, p. 852-862, April 2009c.

POWELL, M. J. D. Radial basis functions for multivariable interpolation: a review. **Algorithms for approximation**. Oxford: Oxford University, 1987. p. 143-167.

PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST. Dispõe sobre as normas que disciplinam o relacionamento entre as distribuidoras de energia elétrica e demais agentes (unidades consumidoras e centrais geradores) conectados aos sistemas de distribuição. Resolução n. 345, de 16 de dezembro de 2008. **Diário Oficial da União**: República Federativa do Brasil: Poder Legislativo, 31 dez. 2008. Col. 1, p. 182. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_0.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2011.

ROSENBLATT, F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. **Psychological Review**, Washington, v. 65, n. 6, p. 386-408, 1958.

RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J. Learning internal representations by error propagation. **Parallel Distributed Processing**, Cambridge, v. 1, p. 318-362, 1986.

SAHA, M.; PROVOOST, F.; ROSOŁOWSKI, E. Fault location method for MV cable networks. In: DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION CONFERENCE, 479., 2001, Amsterdam. **Proceeding...** Amsterdam: [s.n.], 2001. p. 323-326.

SAHA, M. M.; DAS, R.; VEHNO, P.; NOVOSSEL, D. Review of fault location techniques for distribution systems. **Power system communication infrastructures for the future**, Beijing, p. 1-6, September 2002a.

SAHA, M.; ROSOŁOWSKI, E. **Fault location in a medium-voltage network**. Int. CI.⁷ G01R 31/08. US 6,420,876 B1. 09 mar. 1998, 16 jul. 2002b. United States Patent.

SAHA, M.; ROSOŁOWSKI, E. **Method and device of fault location for distribution networks**. Int. CI.⁷ G08B 21/00. US 6,483,435 B2. 11 jul. 2001, 19 nov. 2002c. United States Patent.

SELVAN, M. P.; SWARUP, K. S. Unbalanced distribution systems short circuit analyses - an object-oriented approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL TECHNOLOGIES IN ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING - SIBIRCON, 19., 2008, Novosibirsk. **Proceedings...** New York: IEEE, 2008, p. 1- 6.

SHEPHERD, G. M. **The synaptic organization of the brain**. New York: Oxford University Press, 1990, 719 p.

SHIRMOHAMMADI, D. et al. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power System**, New York, v. 3, n. 2, p. 753-762, May 1988.

SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes neurais artificiais: para engenharia e ciências aplicadas**. São Paulo: Artliber, 2010. 399 p.

SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. **Renewable energy systems: design and analysis with induction generators**. Florida: CRC, 2004. 358 p.

SUAREZ, I. D; CAICEDO, G. C.; VARGAS-TORRES, H. R. Review of stable and transient fault location techniques for distribution systems part I: steady-state locators based on circuit analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, 8., 2010, Granada. **Proceedings...** Granada: [s.n.], 2010a. p. 1-8.

SUAREZ, I. D; CAICEDO, G. C.; VARGAS-TORRES, H. R. Review of stable and transient fault location techniques for distribution systems part II: steady-state knowledge based and transient analysis techniques. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, 8., 2010, Granada. **Proceedings...** Granada: [s.n.], 2010b. p. 1-6.

TINNEY, W. F. Compensation methods for network solutions by optimally ordered triangular factorization. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-91, n. 1, p. 123-127, January 1972.

TONELLI-NETO, M. S.; DECANINI, J. G. M. S.; MINUSSI, C. R. Detecção de faltas de alta impedância em alimentadores de distribuição de energia elétrica usando transformada wavelet e uma rede neural ARTMAP fuzzy. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES, 10., 2011, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: DINCON, 2011a. p. 1-4.

TONELLI-NETO, M. S.; DECANINI, J. G. M. S.; MINUSSI, C. R. Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando uma rede neural ARTMAP fuzzy. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 10., 2011, São João del Rei. **Anais...** São João del Rei: SBAI, 2011b. p.1-6.

WIDROW, B.; HOFF, M. E. Adaptive switching circuits. **Western Electronic Show and Convention**, New York, v. 4, n. 1, p. 96-104, August 1960.

WILLIS, O. L. A review of fault locating techniques in medium-voltage power cable. In: PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY CONFERENCE., 38., 1991, Toronto. **Proceedings...** New York: IEEE, 1991. p. 225-228.

YANG, H. T.; LIAO, C. C. A de-noising scheme for enhancing wavelet-based power quality monitoring system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 16, n. 3, p. 353-360, July 2001.

ZHANG, N.; KEZUNOVIC, M. Implementing an advanced simulation tool for comprehensive fault analysis. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE & EXHIBITION: ASIA & PACIFIC, 2., 2005, Dalian. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2005. p. 1-6.

ZHANG, X. F; SOUDI, F; SHIRMOHAMMADI, D; CHENG, C. S. A distribution short circuit analysis approach using hybrid compensation method. **IEEE Transactions on Power System**, New York, v. 10, n. 4, p. 2053-2059, November 1995.

Apêndice A – Dados do Alimentador

Dados do alimentador de distribuição trifásico real, com 134 barras, tensão nominal de 13,8 kV e potência nominal de 7,065 MVA. A topologia deste sistema está ilustrada na Figura 41. A Tabela A.1 contém os dados do alimentador, com as seções de linhas e seus comprimentos, tamanho dos condutores e cargas conectadas, sendo que as potências especificadas estão conectadas às barras da coluna definida como “Nó Final”. As matrizes de impedâncias de rede para cada trecho do alimentador são:

Seção 0-1: Matriz de impedância equivalente dos sistemas de geração, transmissão e transformador da subestação.

$$[Z_{0-1}] = \begin{vmatrix} 0,1960+j0,530 & 0,1960+j0,530 & 0,290+j1,920 \\ 0,1960+j0,530 & 0,2900+j1,920 & 0,196+j0,530 \\ 0,2900+j1,920 & 0,1960+j0,530 & 0,1960+j0,530 \end{vmatrix} \quad [\Omega]$$

Seção dos condutores de bitola #2:

$$[Z_{\#2}] = \begin{vmatrix} 1,084+j0,998 & 0,0600+j0,478 & 0,060+j0,450 \\ 0,060+j0,478 & 1,084+j0,998 & 0,060+j0,536 \\ 0,060+j0,450 & 0,0600+j0,536 & 1,084+j0,998 \end{vmatrix} \quad [\Omega/\text{Km}]$$

Seção dos condutores de bitola #4:

$$[Z_{\#4}] = \begin{vmatrix} 1,644+j1,006 & 0,060+j0,4780 & 0,060+j0,450 \\ 0,060+j0,478 & 1,644+j1,0060 & 0,060+j0,536 \\ 0,060+j0,450 & 0,060+j0,5360 & 1,644+j1,006 \end{vmatrix} \quad [\Omega/\text{Km}]$$

Seção dos condutores de bitola #1/0:

$$[Z_{\#1/0}] = \begin{vmatrix} 0,7567+j1,0067 & 0,0600+j0,4780 & 0,0600+j0,4500 \\ 0,0600+j0,4780 & 0,7567+j1,0067 & 0,0600+j0,5360 \\ 0,0600+j0,4500 & 0,0600+j0,5360 & 0,7567+j1,0067 \end{vmatrix} \quad [\Omega/\text{Km}]$$

Seção dos condutores de bitola #4/0:

$$[Z_{\#4/0}] = \begin{vmatrix} 0,4272+j0,9609 & 0,0600+j0,4780 & 0,0600+j0,4500 \\ 0,0600+j0,4780 & 0,4272+j0,9609 & 0,0600+j0,5360 \\ 0,0600+j0,4500 & 0,0600+j0,5360 & 0,4272+j0,9609 \end{vmatrix} \quad [\Omega/\text{Km}]$$

Tabela A.1 Dados do Alimentador.

Nó Inicial	Nó Final	Distância (m)	Bitola do Condutor	Potência (kVA)	Nó Inicial	Nó Final	Distância (m)	Bitola do Condutor	Potência (kVA)
0	1	-----	-----	-----	37	38	10,0	#4/0	0
1	2	900,0	#4/0	0	38	39	70,0	#4/0	3
2	3	50,0	#2	45	38	40	100,0	#4/0	0
2	4	100,0	#4/0	0	40	41	60,0	#4	75
4	5	40,0	#4/0	75	40	42	50,0	#4	75
5	6	200,0	#4/0	75	42	43	10,0	#4	75
6	7	200,0	#4/0	112,5	40	44	30,0	#4/0	112,5
7	8	200,0	#4/0	75	44	45	40,0	#4/0	45
8	9	10,0	#4/0	75	38	46	60,0	#4/0	1
9	10	50,0	#4/0	0	46	47	20,0	#4/0	112,5
10	11	100,0	#4	0	47	48	120,0	#4/0	0
11	12	60,0	#4	8,6	48	49	50,0	#4/0	112,5
12	13	30,0	#4	75	49	50	20,0	#4/0	75
13	14	160,0	#4	75	50	51	170,0	#4/0	112,5
11	15	30,0	#4	112,5	48	52	100,0	#4/0	0
15	16	10,0	#4	45	52	53	60,0	#4	1,2
16	17	20,0	#4	112,5	53	54	30,0	#4	112,5
17	18	40,0	#4	0	54	55	130,0	#4	75
18	19	40,0	#2	75	52	56	20,0	#4	75
19	20	50,0	#2	112,5	56	57	80,0	#4	0
18	21	150,0	#2	112,5	57	58	50,0	#2	10
10	22	30,0	#4/0	112,5	57	59	60,0	#2	112,5
22	23	70,0	#4/0	0	59	60	20,0	#2	3,8
23	24	50,0	#4	3	48	61	40,0	#4/0	3
24	25	20,0	#4	45	61	62	10,0	#4/0	5,5
25	26	30,0	#4	0	62	63	50,0	#4/0	0
26	27	60,0	#2	112,5	63	64	30,0	#1/0	75
27	28	40,0	#2	0	64	65	20,0	#1/0	75
28	29	20,0	#2	75	65	66	30,0	#1/0	3,5
29	30	120,0	#2	112,5	66	67	20,0	#1/0	0
28	31	20,0	#2	112,5	67	68	30,0	#4	112,5
26	32	20,0	#4	112,5	67	69	20,0	#4	7
32	33	5,0	#4	112,5	69	70	20,0	#4	112,5
33	34	25,0	#4	112,5	67	71	50,0	#1/0	75
23	35	10,0	#4/0	0	71	72	40,0	#1/0	8,5
35	36	70,0	#4/0	12,4	72	73	40,0	#1/0	1,9
36	37	10,0	#4/0	112,5	73	74	20,0	#1/0	112,5

74	75	110,0	#1/0	112,5	95	96	40,0	#2	75
63	76	20,0	#4/0	112,5	95	97	50,0	#2	6
76	77	30,0	#4/0	5,9	105	106	210,0	#1/0	108,5
77	78	50,0	#4/0	0	106	107	30,0	#1/0	0
78	79	70,0	#4/0	75	107	108	100,0	#1/0	0
79	80	70,0	#4/0	112,5	108	109	100,0	#4	108,5
80	81	30,0	#4/0	112,5	109	110	30,0	#4	112,5
81	82	30,0	#4/0	0	110	111	20,0	#4	112,5
82	83	50,0	#4	75	107	112	170,0	#4/0	75
82	84	50,0	#4/0	75	112	113	110,0	#4/0	0
84	85	30,0	#4/0	112,5	113	114	110,0	#4	0
85	128	20,0	#4/0	0	113	115	200,0	#4	30
128	86	30,0	#4/0	15,5	115	116	200,0	#4	30
86	87	20,0	#4/0	75	116	117	200,0	#4	30
78	88	130,0	#2	75	117	118	200,0	#4	30
78	89	50,0	#4/0	75	90	119	110,0	#2	0
89	90	50,0	#4/0	0	119	120	70,0	#4/0	0
90	91	180,0	#4/0	45	120	121	70,0	#4/0	30
91	92	20,0	#4/0	0	119	122	70,0	#2	55
92	93	30,0	#2	112,5	122	123	130,0	#4	0
92	94	70,0	#2	23,5	123	124	20,0	#4	15,5
92	95	100,0	#4/0	0	123	125	20,0	#4	15,5
97	98	60,0	#2	0	125	126	40,0	#4	45
98	99	110,0	#4	23,5	126	127	40,0	#4	112,5
98	100	40,0	#2	75	128	129	60,0	#2	45
100	101	110,0	#2	112,5	104	130	70,0	#1/0	0

95	102	60,0	#4/0	112,5	130	131	20,0	#4/0	112,5
102	103	40,0	#4/0	0	130	132	100,0	#1/0	0
103	104	30,0	#1/0	75	132	133	40,0	#1/0	112,5
103	105	150,0	#1/0	75	133	134	40,0	#1/0	112,5

Fonte: Pereira (2007).