Lucca Zamboni

Detecção e Localização de Faltas em Sistemas Elétricos de Distribuição Usando Abordagem Inteligente Baseada em Análise Espectral de Sinais

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, sendo parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva

São Carlos

2013

Lucca Zamboni

Detecção e Localização de Faltas em Sistemas Elétricos de Distribuição Usando Abordagem Inteligente Baseada em Análise Espectral de Sinais

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, sendo parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva

São Carlos

2013

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

z24d Zamboni, Lucca.
Detecção e Localização de Falhas em Sistemas Elétricos
de Distribuição Usando Abordagem Inteligente Baseada em
Análise Espectral de Sinais. / Lucca Zamboni; orientador
Ivan Nunes da Silva. São Carlos, 2013.

Tese - Doutorado (Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Elétricos de Potência)-- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Detecção de
Falhas. 3. Sistemas Inteligentes. 4. Análise de Sinais.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUCCA ZAMBONI**.

Título da tese: "Detecção e localização de faltas em sistemas elétricos de distribuição usando abordagem inteligente baseada em análise espectral de sinais".

Data da defesa: 21/10/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Ivan Nunes da Silva (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Rogério Andrade Flauzino**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **José Aquiles Baesso Grimoni**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **José Alfredo Covolan Ulson**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP- Bauru)

Aprovado

Prof. Dr. **Carlos Leônidas da Silva Souza Sobrinho**
(Universidade Federal do Pará/UFPA)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

“A crítica elevada é mais criadora que a própria criação e o principal fim do crítico é ver as coisas como na realidade elas não o são.”

Oscar Wilde (1854-1900)

Agradecimentos

Ao Sábio Professor Dr. Ivan Nunes da Silva, minha sincera gratidão, pela paciência e competência insigne como orientador.

A todos os Professores e Servidores da Universidade São Paulo, em especial aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, pelo incentivo e motivação à execução deste trabalho.

A toda equipe participante do projeto de P&D com destaque aos Professores Rogério, Danilo e Alfredo, sempre nos surpreendendo com novidades e conhecimento.

Aos amigos e colaboradores da EDP, pelo interesse, curiosidade e ajuda, especialmente ao novo Mestre Nerivaldo dos Reis Santos.

À querida Jéssica, companheira em todos os momentos, pelo apoio e compreensão sempre oferecidos, e a Anita minha recém chegada filha.

Ao amigo Daniel Paiva, pelo encorajamento e pontapé inicial nesta empreitada e ao Marcelo, pela sala de estudos com a vista mais inspiradora de todos os tempos.

À minha querida Mãe (*in memoriam*) e ao meu Pai, que sempre me deram apoio e me ensinaram a vontade de sempre querer aprender e fazer mais.

Aos amigos, companheiros de trabalho, colegas e parentes, que de uma forma ou de outra, contribuíram com comentários, sugestões e críticas, sempre me descontraindo nas horas vagas.

Ao Programa de Pesquisa & Desenvolvimento Tecnológico em Energia Elétrica, regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

Resumo

ZAMBONI, L. (2013). Detecção e Localização de Faltas em Sistemas Elétricos de Distribuição Usando Abordagem Inteligente Baseada em Análise Espectral de Sinais. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

O objetivo deste trabalho é estudar a identificação, classificação, localização e setorização de faltas em redes de distribuição radiais, verificar a maneira de aplicar e integrar diversas ferramentas numéricas convencionais, assim como ferramentas de sistemas inteligentes, visando identificar a ocorrência de uma falta, classificar as fases envolvidas com a mesma, e aplicar as diversas ferramentas existentes a fim de localizar em tempo real o eventual local onde houve a ocorrência da falta, permitindo que a mesma possa ser setorizada dentro do sistema da concessionária e informada ao centro de operações, usando uma nova abordagem inteligente baseada em análise espectral de sinais.

Palavras chave: Sistemas elétricos de potência, Detecção de Faltas, Sistemas Inteligentes, Analise de Sinais.

Abstract

ZAMBONI, L. (2013). Fault Detection and Location in Power Distribution Systems Using Intelligent Approach Based in Spectral Signal Analysis. Thesis (PhD) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2013.

The aim of this work is study the identification, classification, location and sectorization of a fault in distribution radial networks, check how to implement and integrate various conventional numerical tools, as well as intelligent systems based tools, to identify the occurrence of a fault, classify the phases involved with it, and apply the various tools available to locate the place where a fault was occurred in real time, enabling it to be sectorized into the utility system and informed to operational center using a new intelligent approach based on spectral signals analysis.

Keywords: *Electrical Power Systems, Fault Detection, Intelligent Systems, Signal Analysis.*

Lista de Siglas e Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFIS	<i>Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CC	<i>Corrente contínua</i>
COD	Centro de Operação da Distribuição
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão
DLF	Faltas fase-fase
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FFF	Faltas trifásicas
FFP	Faltas fase-terra paralela
FFS	Faltas fase-terra série
FFT	Faltas fase-fase- terra
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

SCADA *Supervisory Control and Data Acquisition*

TACS *Transient Analysis Control System*

TC's Transformadores de Corrente

TP's Transformadores de Potencial

Lista de Figuras

Figura 1.1 – DEC de uma concessionária de distribuição.....	8
Figura 1.2 – Causas do DEC de uma concessionária de distribuição.....	8
Figura 1.3 – FEC de uma concessionária de distribuição.	9
Figura 1.4 – Causas do FEC de uma concessionária de distribuição.	9
Figura 1.5 – Multas por indicador de qualidade do serviço de uma concessionária..	10
Figura 2.1 – Configuração da janela de dados.....	29
Figura 2.2 – Formas de onda de corrente e tensão para uma falta fase terra com ocorrência de arco elétrico.	31
Figura 2.3 – Diagrama de blocos do método de diagnóstico de faltas baseado em características estatísticas das correntes de falta.	32
Figura 2.4 – Skewness para uma forma de onda de corrente faltosa e para uma forma de corrente normal.	35
Figura 2.5 – Kurtosis para uma forma de onda de corrente faltosa e para uma forma de corrente normal.	35
Figura 2.6 – Estrutura do sistema de diagnóstico de falta proposto.....	39
Figura 2.7 – Exemplo de base de regras do sistema fuzzy.....	39
Figura 2.8 – Procedimentos para estimação de faltas para o sistema de inferência fuzzy.	40
Figura 2.9 – Fluxograma do algoritmo de localização de falta proposto.	42
Figura 2.10 – Classificação de perturbações no domínio wavelet.....	44
Figura 2.11 – Ilustração de um sinal composto por diversas perturbações e sua representação no domínio wavelet.....	45
Figura 2.12 – Diagrama de blocos do esquema de detecção proposto.	47

Figura 2.13 – Diagrama de blocos representando o filtro adaptativo.....	47
Figura 2.14 – Diagrama de blocos de modelo da falta de alta impedância.....	50
Figura 2.15 – Diagrama esquemático do sistema de localização de faltas por meio de redes neurais artificiais.	53
Figura 2.16 – Distância de falta em função dos autovalores.	54
Figura 2.17 – Modelo computacional para automatização do tratamento de faltas em sistemas de distribuição.....	56
Figura 3.1 – Modelo reduzido representativo da Topologia 1, a qual possui somente o alimentador principal.....	61
Figura 3.2 – Modelo reduzido representativo da Topologia 2, a qual possui tanto o alimentador principal como um ramo lateral.	61
Figura 3.3 – Forma de onda obtida quando da ocorrência de uma falta na Topologia 1.	62
Figura 3.4 – Forma de onda obtida quando da ocorrência de uma falta na Topologia 2.	62
Figura 3.5 – Métodos convencionais de busca da região faltosa.	70
Figura 3.6 – Modelo de uma falta de alta-impedância.	72
Figura 3.7 – Sistema de distribuição com geração distribuída.....	73
Figura 3.8 – Circuito de exemplo para localização de faltas.....	75
Figura 4.1 – Representação esquemática do sistema de identificação e localização de faltas.	81
Figura 4.2 – Diagrama esquemático do sistema identificador de faltas.	83
Figura 4.3 – Diagrama esquemático para o sistema de identificação da tipologia da falta.	83

Figura 4.4 – Diagrama esquemático para discriminação das fases participantes para faltas do tipo DLF e FFT.....	84
Figura 4.5 – Diagrama esquemático para discriminação das fases participantes para faltas do tipo FFP e FFS.....	84
Figura 4.6 – Processo de segmentação da oscilografia.....	87
Figura 4.7 – Representação do alimentador JCE1312.....	90
Figura 4.8 – Representação do alimentador e suas derivações.....	91
Tabela 4.1: Equações da Impedância Aparente $Z = V/I$	92
Figura 4.9 – Diagrama unifilar do sistema.....	93
Figura 4.10 – Método da impedância aparente AN mede corretamente a reatância até a falta para uma linha radial.	94
Figura 4.11 – Sobrealcance da impedância aparente AN com RF e fluxo de potência exportado ($\delta = 30^\circ$).....	95
Figura 4.12 – O Desempenho do critério de impedância aparente depende de RF e de δ	96
Figura 4.13 – Sistema elétrico no instante pré-falta.	97
Figura 4.14 – Sistema elétrico no instante de ocorrência de uma falta.	98
Figura 4.15 – Sistema elétrico equivalente no instante de ocorrência de uma falta..	99
Figura 4.16 – Rede de sequencia para uma falta fase-terra.	102
Figura 4.17 – Modelo simplificado do alimentador de distribuição.	106
Figura 4.18 – Modelo completo do alimentador de distribuição.	109
Figura 4.19 – Impedância Z_1 para o INP1306.....	111
Figura 4.20 – Impedância Z_0 para o INP1306.....	111
Figura 4.21 – Impedâncias harmônicas – MCI1305.	112
Figura 4.22 – Exemplo de localização de faltas com múltiplas frequências.....	113

Figura 4.23 – Detecção da alteração da potência ativa e reativa para uma oscilografia de falta.....	114
Figura 4.24 – Arquitetura do sistema de localização de faltas.....	115
Figura 4.25 – Mapa de evolução da Reatância – INP1306.....	116
Figura 4.26 – Mapa de evolução da Resistência – INP1306.	116
Figura 4.27 – Mapa de evolução da Reatância – MCI1305.....	117
Figura 4.28 – Mapa de evolução da Resistência – MCI1305.....	117
Figura 4.29 – Exemplo de arquivo “.CFG” gerado pelo sistema instalado na SE...	120
Figura 4.30 – Exemplo de arquivo “.DAT” gerado pelo sistema instalado no alimentador MCI1305.....	120
Figura 4.31 – Conteúdo do arquivo “.ZIP” gerado pelo sistema instalado na SE. ..	122
Figura 4.32 – Exemplo de arquivo “.GZ” gerado pelo sistema instalado no alimentador MCI1305.....	122
Figura 4.33 – Banco de dados de faltas.	124
Figura 4.34 – Rede virtual entre a ETD piloto e COD.....	125
Figura 5.6 – Cruzamento (fase 1).....	128
Figura 5.7 – Cruzamento (fase 2).....	128
Figura 5.8 – Oscilografia JCE1312-71 completa.	130
Figura 5.9 – Detalhe da oscilografia JCE1312-71.	131
Figura 5.10 – Detalhe da oscilografia JCE1312-72.	131
Figura 5.11 – Detalhe da oscilografia JCE1312-73.	132
Figura 5.12 – Detalhe da oscilografia JCE1312-74.	132

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Resultados obtidos com a aplicação do método proposto sobre faltas geradas no modelo reduzido de alimentador (Topologia 2).....	63
Tabela 3.2 – Resultados obtidos com a aplicação do método proposto sobre dados reais de faltas.....	64
Tabela 3.3 – Resultados obtidos para faltas fase-terra geradas no início do alimentador.	66
Tabela 3.4 – Resultados obtidos para diversos tipos de faltas ocorridas em um sistema de distribuição real.....	67
Tabela 4.1: Equações da Impedância Aparente $Z = V/I$	92
Tabela 4.2 – Banco de Dados (armazenamento das informações de faltas)	124
Tabela 5.1 – Cruzamento de oscilografias para JCE1312.	134
Tabela 5.2 – Cruzamento de oscilografias para BIR1305.	135
Tabela 5.3 – Cruzamento de oscilografias para MCI1305.	136
Tabela 5.4 – Cruzamento de informações oscilográficas – JCE1312.	138
Tabela 5.5 – Cruzamento de informações oscilográficas – INP1306.....	139
Tabela 5.6 – Cruzamento de informações oscilográficas – BIR1305.....	139
Tabela 5.7 – Cruzamento de informações oscilográficas – MCI1305.	140

Sumário

Resumo	xi
Abstract.....	xiii
Lista de Siglas e Abreviaturas	xv
Lista de Figuras.....	xvii
Lista de Tabelas	xxi
 1. Introdução.....	 1
1.1 Motivação e relevância do trabalho.....	1
1.2 Identificação de faltas vs. qualidade do serviço	6
1.3 Proposta e justificativa do trabalho.....	11
1.4 Contribuições do trabalho	15
1.5 Organização do documento	17
1.6 Publicações realizadas.....	17
1.6.1 <i>Congressos internacionais</i>	17
1.6.2 <i>Periódico internacional</i>	18
1.6.3 <i>Capítulo de livro internacional</i>	19
 2. Estado da Arte Referente às Principais Metodologias Empregadas na Detecção de Faltas em Sistemas de Distribuição	 21
2.1 Introdução	21
2.2 Detecção de faltas de alta impedância em alimentadores de sistema de distribuição utilizando redes neurais artificiais	27
2.3 Técnicas de identificação de faltas de alta impedância utilizando redes neurais artificiais e transformada de Fourier	28
2.4 Abordagem neural utilizando características estatísticas das correntes de falta 30	
2.5 Modelagem fuzzy aplicada na identificação de faltas de alta impedância com característica passiva	36
2.6 Método para diagnóstico de faltas em subestações de distribuição utilizando sistemas fuzzy e redes de causa e efeito.....	38
2.7 Técnicas de localização de faltas baseadas em sinais de alta frequência e transformada wavelet	41
2.8 Classificação e medição dos níveis de perturbação em sistema de potência por meio de wavelet.....	43
2.9 Detecção de distúrbios em sistemas de distribuição utilizando wavelet....	46
2.10 Modelagem de faltas de alta impedância baseada na teoria de arcos elétricos49	
2.11 Localização de faltas por meio de redes neurais artificiais e da transformada de Clarke-Concórdia	51
2.12 Tratamento automatizado de faltas em linhas de distribuição.....	54
2.13 Considerações parciais	57

3. Propostas Modernas para Detecção de Falhas em Sistemas de Distribuição	59
3.1 Introdução.....	59
3.2 Propostas convencionais para a detecção de falhas.....	59
3.2.1 <i>Localização de falhas em sistemas de distribuição utilizando análise multiresolução de transformadas wavelets.....</i>	<i>60</i>
3.2.2 <i>Metodologia de localização de falhas baseada na arquitetura do alimentador e medidas tomadas na subestação.....</i>	<i>65</i>
3.3 Propostas inteligentes para a detecção de falhas	67
3.3.1 <i>Estratégia para localização de falhas monofásicas em sistemas de distribuição utilizando sistemas fuzzy, wavelets e FFT.....</i>	<i>68</i>
3.3.2 <i>Localização de falhas de alta-impedância em alimentadores de distribuição com geração distribuída</i>	<i>71</i>
3.3.3 <i>Localização de falhas utilizando informações qualitativas da rede .</i>	<i>74</i>
3.3.4 <i>Localização de falhas utilizando sistemas inteligentes híbridos.....</i>	<i>76</i>
3.4 Considerações parciais	77
4. Aspectos da Metodologia Desenvolvida	79
4.1 Introdução.....	79
4.2 Aspectos do sistema automatizado para identificação e localização de falhas	80
4.3 Sistema de aquisição de dados elétricos.....	85
4.3.1 <i>Automatização das etapas de identificação e localização de falhas</i>	<i>85</i>
4.4 Sistema para modelagem de alimentadores para fins de identificação e localização de falhas	89
4.5 Aspectos de método inovador para propósitos de localização de falhas...	92
4.6 Mapas de impedâncias para discriminar seção faltosa	115
4.7 Conversão de arquivos COMTRADE para auxiliar processos de localização de falhas pelo Centro de Operação da Distribuição.....	118
4.8 Implementação de sistema de comunicação em tempo real	123
4.9 Considerações parciais	125
5. Resultados Experimentais	127
5.1 Introdução.....	127
5.2 Análise comparativa entre registros oscilográficos e eventos	128
5.3 Análise de oscilografias referentes às falhas dos alimentadores piloto ...	134
6. Considerações Finais e Continuidade do Trabalho.....	141
6.1 Conclusões gerais	141
6.2 Continuidades do trabalho	144
Referências Bibliográficas.....	145
Apêndices.....	153
Apêndice A - Código da função para Identificação dos segmentos de falta ...	153
Apêndice B - Código função para determinação da fase participante da falta	154
Apêndice C - Código da função para análise de reatância e resistência de falta para cada segmento	155
Apêndice D - Código de conversão dos arquivos “.DAQ” para COMTRADE .	156
Apêndice E - Sistema de Oscilografia	158

1. Introdução

1.1 *Motivação e relevância do trabalho*

A detecção, a classificação e a localização de faltas em sistemas de energia elétrica constituíram-se, ao longo dos anos, em metas almejadas por diversos setores do sistema elétrico de potência, tais como os setores de transmissão e distribuição de energia elétrica. Assim, em função da declarada demanda por sistemas automáticos capazes de detectarem, classificarem e localizarem faltas em sistemas de energia elétrica, observa-se junto à literatura correlata proposições de trabalhos que fazem uso das mais distintas ferramentas, nas mais variadas conjunções, com o intuito de contribuir à concretização das bases envolvidas com o trinômio detecção-classificação-localização de faltas.

Alguns autores, por exemplo, propuseram o emprego de algoritmos computacionais baseados na análise da hexa-decomposição dos fasores de tensão e de corrente do sistema elétrico sob falta com o objetivo de determinar sua localização, ou seja, determinar o quão distante da fonte a falta ocorreu (Chunju *et al.*, 2005). Essa metodologia inicialmente foi proposta para elaboração de algoritmos específicos para proteção de sistemas de energia elétrica (Yaozhong, 1996). No entanto, conforme apresentado nas discussões (Chunju *et al.*, 2005), a grande limitação da abordagem proposta é a necessidade de se efetuar medição em pelo

menos dois pontos do sistema, ou seja, essa metodologia torna-se mais adequada à localização de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica do que em sistemas de distribuição.

Contornando o inconveniente da obrigação de se efetuar medições das tensões e correntes trifásicas em pelo menos dois pontos do sistema de energia elétrica, delineia-se uma proposição para a identificação de faltas empregando-se apenas um conjunto de medições (Mahmood *et al.*, 2004).

Assim, de posse desse conjunto e de suas correspondentes decomposições em componentes simétricas, a abordagem proposta estrutura a matriz de impedância do sistema e, por meio de sua dinâmica temporal, sugere-se que o trecho sob falta possa ser determinado. A fim de validar a abordagem proposta, estudos de caso são então conduzidos e os resultados providos pela metodologia são comparados com aqueles que de fato denotam a realidade das faltas simuladas. Porém, apesar da correta identificação das faltas em grande parte dos casos, os autores pontuam que a eficiência da técnica está condicionada à precisão das impedâncias da linha de distribuição. Dessa forma, as simples e constantes variações de carga, umidade e de temperatura ambiente, por exemplo, seriam capazes de comprometer a eficiência da abordagem desenvolvida. Constata-se assim, que essas metodologias, tais como a destacada por Mahmood *et al.* (2004), carecem de robustez frente à dinâmica não-linear de um sistema elétrico de potência o que pode gerar falsos alarmes ou inoperância sob certas condições.

Uma forma de contornar as limitações de técnicas determinísticas, como aquela destacada em Mahmood *et al.* (2004), é incorporar ao sistema proposto redundâncias de informações. Tendo como base essa constatação, a qual é herdada de outros ramos do conhecimento, outros autores apresentaram um

trabalho (Choi *et al.*, 2004), onde procuraram não apenas se valer de impedâncias calculadas a partir da topologia física da rede, mas também de seus valores obtidos por meio das medidas de tensão e de corrente constantemente oscilografados na subestação de origem do alimentador sob monitoramento. No referido trabalho, resultados de simulações computacionais são destacados e a qualidade das respostas são superiores àqueles obtidos por técnicas convencionais. Porém, limitações quanto à localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica com correntes desbalanceadas são pontuadas, podendo o erro de estimação ser de até 25%.

Contornando as limitações das técnicas convencionais, os sistemas inteligentes surgem como uma nova proposta à tratabilidade de problemas cujas soluções são intrinsecamente complexas. Esse é o caso da detecção, classificação e localização de faltas de sistemas de distribuição de energia elétrica onde, em virtude do número e da não-linearidade das variáveis envolvidas, a precisão, a robustez e a eficácia de um sistema dedicado a essas finalidades podem ser profundamente afetadas quando constituído unicamente por ferramentas ditas convencionais.

Um exemplo dessa nova tendência é o trabalho de Luo *et al.* (2004), em que técnicas correlatas aos espaços esparsos e algoritmos genéticos são combinadas de maneira a constituir um sistema capaz de localizar faltas em sistemas de energia elétrica. Assim, o referido trabalho buscou contornar a problemática do mau condicionamento das matrizes de admitância do sistema por meio de técnicas convencionais, sendo que o problema da localização de faltas é realizado por meio dos algoritmos genéticos, os quais possuem eficiência comprovada quando da busca por soluções ótimas.

Outro exemplo de convergência de técnicas convencionais e de sistemas inteligentes é o trabalho de Youssef (2004), cujo objetivo de seu desenvolvimento foi a classificação de faltas em sistemas de energia elétrica por meio de análise multi-nível fornecida pela decomposição *wavelet* das formas de onda de tensão e de corrente. Esse tipo de ferramenta reconhecidamente fornece informações sobre distúrbios em sistemas elétricos de potência e possui ampla aplicabilidade no contexto da qualidade de energia, uma vez que permite uma análise no domínio do tempo e da frequência simultaneamente. No entanto, a análise dos resultados oriundos de tal ferramenta para processamento de sinais não se procede de forma natural e é necessária grande experiência para que as conclusões alcançadas sejam factíveis aos fatos reais.

Por outro lado, os sistemas de inferência *fuzzy* possuem a meta de emularem a forma aproximada do raciocínio humano. Desta forma, Youssef (2004) apresenta em outro trabalho, como se pode implementar, por meio das ferramentas de processamento de sinais empregados e por intermédio dos sistemas *fuzzy*, um sistema para classificação de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica com habilidades para distinguir as faltas reais frente às situações de manobras programadas no sistema, como por exemplo, a energização de transformadores.

Além dos algoritmos genéticos e dos sistemas de inferência *fuzzy*, outra ferramenta advinda da inteligência computacional são as redes neurais artificiais. Como exemplo da aplicação das redes neurais no contexto da localização de faltas em sistemas de distribuição destaca-se o trabalho de Martins *et al.* (2005), onde os autores conduzem sua pesquisa empregando decomposições vetoriais das formas de onda de tensão e de corrente e redes neurais artificiais para a determinação do local de ocorrência da falta no referido sistema.

No entanto, mesmo diante do emprego de sistemas inteligentes, os resultados comprobatórios podem não possuir todos os requisitos almejados, ou ainda, tais resultados são dignos de melhorias. Tendo tais aspectos como premissa, é cada vez mais comum o desenvolvimento de sistemas para a detecção, classificação e localização de faltas que fazem uso não de apenas um sistema especialista, mas sim de vários desses sistemas dispostos de maneira ordenada. Esse é o caso de uma abordagem que emprega redes neurais artificiais dispostas em paralelo, cada qual sendo responsável por indicar qual fora o tipo e localização da falta (Mahanty e Gupta, 2004).

Mais recentemente, uma pesquisa desenvolvida pela Universidade do Texas (Depew *et al.*, 2006) e fomentada em parte pelo *Electric Power Research Institute (EPRI)* utiliza um sistema especialista de reconhecimento de padrões dos níveis harmônicos para detectarem faltas de alta impedância, o qual usa uma taxa de amostragem de 64 amostras/ciclo nas entradas de corrente alternada visando fornecer um padrão espectral usado nas análises das assinaturas.

Assim, observa-se que esses tipos de abordagens, empregando técnicas inteligentes e técnicas convencionais para tratamento de faltas, são bem promissoras e que já vêm proporcionando resultados bem expressivos. Tais estratégias são denominadas híbridas, pois combinam uma ou mais ferramentas inteligentes a outras com reconhecidas características de tratamento de sinais. Este é o caso também da abordagem apresentada em Moshtagh e Aggarwal (2004), onde o avançado processamento de sinais proporcionado pela transformada *wavelet* é empregado para se extrair características dos sinais de tensão e corrente e, em seguida, são apresentados a um sistema *fuzzy* para a inferência do local da falta.

Paralelamente, conforme historicamente relatado em Zaborzsky (1980), a integração e a comunicação de sistemas voltados à operação de um sistema elétrico de potência é uma tônica mundial desde meados dos anos 70. É certo, porém, que nesses mais de 30 anos de evolução dos sistemas de controle e monitoramento muitos conceitos foram criados, bem como novas alternativas para redução de custos com tais sistemas foram implementadas (Tomsovic, 2005).

Acompanhando as tendências de um moderno sistema de supervisão e controle da distribuição, almeja-se disponibilizar aqui um sistema integrado que auxilie os operadores do sistema de distribuição a tomarem decisões mais acertadas, contribuindo assim para o aumento dos índices de desempenho e, conseqüentemente, aumento do nível de satisfação de seus clientes.

1.2 Identificação de faltas vs. qualidade do serviço

Os Procedimentos de Distribuição – PRODIST (ANEEL, 2011) estabelece em seu Módulo 8 os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica – QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

As distribuidoras são avaliadas em diversos aspectos no fornecimento de energia elétrica. Entre eles, está a qualidade do serviço e do produto oferecidos aos consumidores.

A qualidade dos serviços prestados compreende a avaliação das interrupções no fornecimento de energia elétrica. A qualidade do produto caracteriza os fenômenos, estabelece os parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão.

Destacam-se no aspecto da qualidade do serviço os indicadores de continuidade coletivos, DEC e FEC, e os indicadores de continuidade individuais

DIC, FIC e DMIC, De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, são aqueles indicadores que aferem a qualidade de fornecimento de energia elétrica de determinada distribuidora, considerando os aspectos da “frequência de interrupções” e “duração das interrupções”. A duração e frequência das interrupções estão diretamente ligadas aos processos de identificação e localização e eliminação de faltas.

Os indicadores coletivos e individuais são respectivamente determinados e aferidos por conjunto de unidades consumidoras da área de concessão (DEC e FEC) e por unidade consumidora (DIC, FIC e DMIC), conforme descrito a seguir.

DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora): indica o número de horas que, em média, as unidades consumidoras de determinado conjunto ficaram sem energia elétrica durante um determinado período: mensal, trimestral ou anual;

FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora): indica quantas vezes, em média, as unidades consumidoras de determinado conjunto sofreram interrupção;

DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora): quantidade de horas que o consumidor ficou sem energia elétrica;

FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora): quantidade de interrupções que o consumidor experimentou no período de apuração (mensal, trimestral ou anual);

DMIC (Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora): indica o número de horas da maior interrupção experimentada pelo consumidor no período de apuração.

Na Figura 1.1, pode-se observar a evolução do DEC anual móvel de uma empresa de distribuição de energia elétrica do Brasil e sua comparação com períodos de referencia anteriores.

Figura 1.1 – DEC de uma concessionária de distribuição.

Na Figura 1.2 podem-se observar as principais causas da duração da interrupção identificadas nesse período. Nota-se uma participação expressiva da vegetação e deterioração de equipamentos.

Figura 1.2 – Causas do DEC de uma concessionária de distribuição.

De forma análoga, pode-se verificar nas Figuras 1.3 e 1.4, para a mesma empresa e período de apuração, os dados da frequência de interrupções (FEC) e suas principais causas.

Figura 1.3 – FEC de uma concessionária de distribuição.

Figura 1.4 – Causas do FEC de uma concessionária de distribuição.

Nota-se que apesar da frequência possuir certa margem em relação ao limite estabelecido pelo regulador, a duração ficou muito próxima desse limite. Essa análise permite verificar que apesar do número de interrupções estarem dentro das expectativas para a região, o tempo de restabelecimento do sistema ficou próximo do limite regulatório, o que pode ser beneficiado com uma rápida e correta identificação e localização de faltas.

Todos os anos são estabelecidos pelo Órgão Regulador limites para a qualidade do serviço prestado em dois aspectos (frequência e duração das interrupções) e, havendo violação dos indicadores individuais (DIC, FIC e DMIC), a distribuidora deve realizar compensação ao consumidor afetado, na forma de crédito na fatura, em até dois meses após o período de apuração. O consumidor não precisa realizar qualquer solicitação, pois o cálculo e o crédito devem ser realizados automaticamente pela distribuidora.

A Figura 1.5 registra as penalidades de uma concessionária no ano de 2012 pelo não cumprimento da qualidade do serviço. Pode-se notar que o maior custo de compensações pagas aos consumidores é relativo a transgressões na duração da interrupção.

Figura 1.5 – Multas por indicador de qualidade do serviço de uma concessionária.

Sistemas eficientes para identificação e localização de faltas começam a tomar grande importância nas empresas de distribuição à medida que contribuem efetivamente na redução de eventos de maior impacto financeiro e, também, na redução de custos da interrupção do fornecimento.

Assim, sistemas inteligentes de baixo custo e de alto valor agregado podem rapidamente se converterem em retornos financeiros.

1.3 Proposta e justificativa do trabalho

As justificativas referentes ao desenvolvimento desta tese de doutorado são pautadas em investigações técnico-científicas e fatos que inspiram a importância e relevância do tema, os quais são delineados nos parágrafos a seguir.

Atualmente tem sido verificada junto ao setor elétrico brasileiro uma constante busca pela melhoria dos serviços prestados pelas companhias de distribuição de energia elétrica aos seus clientes. Sobretudo, essa busca pelo acréscimo na qualidade procura reduzir as durações e frequências das interrupções do fornecimento de energia elétrica a níveis considerados adequados pela comunidade técnica internacional e pelos órgãos reguladores do setor de energia elétrica. Esta preocupação cresce proporcionalmente ao nível de industrialização da nação, pois eventuais paradas não programadas do sistema acarretam prejuízos econômicos a todos os setores dependentes deste sistema. De maneira ampla, pode-se caracterizar todo este empenho tendo como objetivo geral a melhoria da robustez dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Dentro desse contexto, destaca-se o desenvolvimento sempre crescente de técnicas e metodologias para identificação e localização de faltas em alimentadores responsáveis pela distribuição de energia elétrica. O aporte conferido a este desenvolvimento fundamenta-se na constatação de que grande parte das interrupções não programadas no fornecimento de energia elétrica pelo sistema de distribuição provém da ocorrência de faltas ao longo da extensão dos alimentadores. Desta forma, técnicas modernas e eficientes para detecção e localização de faltas

têm sido desenvolvidas para auxiliar na tomada de decisão dos Centros de Operação do sistema de distribuição.

Como benefício direto da aplicação de tais técnicas pode-se constatar o aumento da eficiência das equipes de manutenção quando da extinção de faltas no sistema de distribuição, pois tais equipes serão despachadas para o local bem provável da ocorrência da falta, minimizando, portanto, o tempo de restabelecimento do serviço.

Paralelamente, as investigações que levem a esquemas eficientes que permitam a identificação e localização de faltas de maneira rápida e confiável são assuntos de suma importância para as concessionárias de distribuição de energia elétrica, tendo em vista que os resultados decorrentes podem implicar em incrementos substantivos dos índices de qualidade e confiabilidade dos serviços oferecidos aos seus clientes. A adoção de tais práticas que levem então a incrementar esses índices tem sido também incentivada pelos agentes da atual legislação que rege o setor elétrico brasileiro, os quais tem constantemente acompanhado a qualidade dos serviços fornecidos pelas concessionárias de distribuição por meio da avaliação mensal dos índices de qualidade individual e coletivo DIC e DEC.

Diante deste quadro, um efetivo projeto de esquemas que levem à identificação e localização de faltas de forma eficiente deve levar em consideração dois aspectos fundamentais. O primeiro aspecto refere-se à definição de técnicas e metodologias efetivas que objetivam discriminar as características dos diversos tipos de faltas que podem incidir no sistema de distribuição. Já o segundo aspecto a ser tratado tem como foco principal o desenvolvimento de ferramentas que serão

responsáveis pela automatização em tempo-real de todo processo de tomada de decisão por parte do Centro de Operação da Distribuição (COD).

O primeiro aspecto mencionado anteriormente já tem sido tratado de forma exaustiva e abrangente em diversos trabalhos, dentre as quais se destacam dissertações de mestrado, teses de doutorado, pesquisas de pós-doutorado e a produção de vários artigos técnico-científicos, os quais têm como resultados um conjunto de diversos sistemas especialistas dedicados à identificação e localização de faltas no sistema de distribuição.

Mais especificamente, projetaram-se, em primeira instância, diversos sistemas especialistas eficientes que identificam se a perturbação (distúrbio) observada nos alimentadores deveu-se ou não a uma falta ocorrida no mesmo. Após a identificação real da falta, os sistemas especialistas estimam o trecho (relativo à subestação) em que ocorreu o defeito no respectivo alimentador. Os sistemas que já foram desenvolvidos utilizam ferramentas inteligentes (redes neurais artificiais e sistemas de inferência *fuzzy*) integrados com diversas outras ferramentas matemáticas e computacionais que têm sido também utilizadas neste tipo de problema.

As compilações dos resultados obtidos a partir de ensaios experimentais demonstram que as tecnologias desenvolvidas fornecem respostas bem precisas, identificando de forma eficiente diversas situações de faltas ocorridas no alimentador.

Os resultados finais foram plenamente satisfatórios, sendo os mesmos testados e validados tanto através de dados advindos de simulações como também aqueles obtidos de oscilografias de faltas realizadas em subestações reais.

Assim, outro aspecto motivador que justifica a factibilidade do desenvolvimento da presente tese é que a mesma está pautada em resultados sólidos que já têm sido alcançados, permitindo então partir para a segunda fase (segundo aspecto) para que se obtenham esquemas eficientes de localização e identificação de faltas em sistemas de distribuição, ou seja, a automatização de todos os processos envolvidos nesses esquemas, permitindo a tomada eficiente de decisão por parte do Centro de Operação da Distribuição.

Desta forma, este trabalho almeja, ao longo de todas as suas etapas metodológicas, levantar os principais aspectos relacionados com a implementação eficiente de novos processos envolvidos com a localização e identificação de faltas frente às ocorrências das mesmas, cujos resultados podem trazer uma elevada agregação de valores aos procedimentos utilizados por uma concessionária no que tange à temática de identificação e localização de faltas em seu sistema de distribuição.

Por meio da constituição de um banco de dados de ocorrências de faltas, tornar-se-á também viável a elaboração de estratégias que visam à melhoria e ampliação da rede de distribuição. Dessa forma, procura-se por meio desse trabalho a sistematização de metodologias que auxiliem não apenas a operação do sistema, mas também a área de engenharia e de manutenção da concessionária como um todo.

Em suma, o objetivo final do trabalho consiste em disponibilizar uma nova ferramenta que visa identificar, quase que instantaneamente, a ocorrência de faltas e de distúrbios transitórios no sistema primário de distribuição, bem como determinar a respectiva origem e sua provável localização usando abordagens inteligentes baseadas em análise espectral de sinais.

1.4 Contribuições do trabalho

O principal aspecto inovador do trabalho está no desenvolvimento e na concepção de todos os processos envolvidos com a automatização dos esquemas de identificação e localização de faltas em alimentadores do sistema de distribuição de uma concessionária, analisando de forma integrada os diversos aspectos técnicos e operacionais envolvidos com os mesmos, os quais serão responsáveis pela extração de características de diversos padrões de faltas, principalmente as faltas de alta impedância, podendo efetivamente contribuir para minimização dos impactos das faltas sobre o sistema de distribuição.

As ferramentas disponíveis hoje em dia são normalmente aplicadas de maneira isolada usando apenas uma ou duas técnicas de identificação e localização de faltas, sendo que as mesmas são bem limitadas a determinadas situações de faltas.

Diferentemente, outro fator de inovação do trabalho proposto é que a metodologia formulada utilizará de ferramentas inteligentes e convencionais, que serão integradas e sintonizadas entre si por um sistema especialista, visando reunir as potencialidades individuais de cada uma delas num único sistema. Assim, a tecnologia proposta possui um grau de robustez e eficiência bem superiores às demais técnicas.

Outro fator de inovação também associado ao trabalho é que o mesmo executará a identificação e localização de faltas utilizando informações registradas somente nas subestações, fato este que difere o sistema proposto de outras ferramentas as quais requerem também a medição de sinais ao longo dos alimentadores.

Portanto, as características diferenciais do sistema de automatização a ser proposto neste trabalho estão pautadas em sua abrangência de agregação tecnológica e na sua análise integrada de diversos fatores e características que estão associados com os processos que possibilitam a identificação e localização de faltas de maneira eficiente e robusta.

Em suma, o que se propõe é a confecção e a agregação de todo o ferramental necessário para que essas técnicas comprovadamente eficazes sejam viabilizadas do ponto de vista técnico e de operacionalização por parte do Centro de Operação de uma concessionária de distribuição de energia elétrica.

Assim, o que se busca é o domínio de toda tecnologia envolvida com os processos de identificação e localização de faltas, levando-se em consideração desde as fases iniciais de aquisição e tratamento de sinais, passando pelas diversas metodologias desenvolvidas para a correta extração de características dos padrões de faltas e indo até a fase final, a qual possibilitará a disponibilização de todos os subsídios necessários para auxiliar a correta tomada de decisão por parte do Centro de Operação da Distribuição.

Portanto, pretende-se neste trabalho estudar a Identificação, Classificação, Localização e Setorização de Faltas, verificar maneiras de aplicar e integrar diversas ferramentas de sistemas inteligentes, assim como ferramentas numéricas convencionais, visando detectar em tempo-real a ocorrência de uma falta e classificar as fases envolvidas com a mesma, e aplicar as diversas ferramentas existentes a fim de localizar em tempo-real o eventual local onde houve a ocorrência da falta, permitindo então que a mesma possa ser setorizada dentro do sistema da concessionária usando uma nova abordagem inteligente baseada na análise espectral de sinais.

1.5 Organização do documento

Este documento será organizado em 5 capítulos conforme se segue.

A motivação, relevância, justificativas e contribuições do trabalho foram registradas neste Capítulo 1.

No Capítulo 2 será apresentado o estado da arte referente às principais metodologias clássicas empregadas na detecção de faltas em sistemas de distribuição.

No Capítulo 3 serão apresentadas propostas modernas, tanto convencionais como inteligentes, para detecção de faltas em sistemas de distribuição.

No Capítulo 4 serão apresentados os aspectos da metodologia desenvolvida para o sistema automatizado para identificação e localização de faltas e do método inovador para propósitos de localização de faltas.

No Capítulo 5 serão apresentados alguns resultados experimentais

No Capítulo 6 serão feitas as considerações finais a respeito deste trabalho, assim como se apresentarão também as propostas de continuidade desse trabalho.

1.6 Publicações realizadas

Ao longo da execução deste trabalho, foram realizadas algumas contribuições técnico-científicas em congressos internacionais, periódico internacional e capítulo de livro que evidenciam a originalidade desta pesquisa, conforme citado a seguir:

1.6.1 Congressos internacionais

1. Lucca Zamboni, Nerivaldo dos Reis Santos, Leandro Nascimento Soares, Ivan Nunes da Silva, Danilo H. Spatti, Rogério A. Flauzino. "Expert System Solution for Fault Detection Purposes in Power Distribution Systems", **World**

Congress in Computer Science, Computer Engineering, and Applied Computing at the International conference on Artificial Intelligence (ICAI'13), 2013.

2. Nerivaldo dos Reis Santos, Lucca Zamboni, Leandro Nascimento Soares, Ivan Nunes da Silva, Danilo H. Spatti. "Identificação e Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição Utilizando Sistemas Especialistas Híbridos", **9th Latin_american Congress: Eletricity Generation and Transmission**, 2011.

3. Lucca Zamboni, Ivan Nunes da Silva, Leandro Nascimento Soares, Danilo H. Spatti, "Automated Integration of Intelligent Architectures for Purposes of Fault Detection in Distribution Systems", **XVIII IEEE International Congress of Electronic, Electrical and Systems Engineering**, 2011.

4. Lucca Zamboni, Ivan Nunes da Silva, Leandro Nascimento Soares, Ricardo Augusto Souza Fernandes. "Integração Automatizada de Arquiteturas Inteligentes para Propósitos de Detecção de Faltas em Sistemas de Distribuição", **IEEE/IAS - IX International Conference of Industry Applications**, 2010.

1.6.2 Periódico internacional

1. Lucca Zamboni, Ivan Nunes da Silva, Leandro Nascimento Soares, Ricardo Augusto Souza Fernandes. "Fault Detection in Power Distribution Systems Using Automated Integration of Computational Intelligence Tools". **IEEE Latin America Transactions**, vol. 9, pp. 522-527, 2011.

1.6.3 Capítulo de livro internacional

1. Ivan N. da Silva, Nerivaldo R. Santos, Lucca Zamboni, Leandro N. Soares, José A. C. Ulson, Rogério A. Flauzino, Danilo H. Spatti, Ricardo A. S. Fernandes, Marcos M. Otsuji and Edison A. Goes. “Intelligent Expert System for Protection Optimization Purposes in Electric Power Distribution Systems”, ***Intelligent Systems***, ISBN 979-953-307-593-7, pp. 277-296, 2012.

2. Estado da Arte Referente às Principais Metodologias Empregadas na Detecção de Falhas em Sistemas de Distribuição

2.1 Introdução

A manutenção da continuidade no fornecimento de energia elétrica pelas concessionárias distribuidoras de energia elétrica, de suma importância para todos os setores da sociedade, pode ser fragilizada devido às faltas causadas por uma variedade de situações, tais como condições climáticas, contatos de árvores, falhas de equipamentos, acidentes, etc. Se houverem informações sobre a falta, mais rápido é o processo de manutenção e, conseqüentemente, mais rápido é o restabelecimento da energia elétrica (Cho e Há, 1998).

O progresso dos sistemas elétricos de potência está intimamente ligado com o progresso de sua proteção. A localização rápida e precisa de uma falta é imprescindível para uma operação segura e econômica em um sistema elétrico de potência (Zahra *et al.*, 2000).

As interrupções a que os consumidores são submetidos se enquadram dentro da área de qualidade da energia elétrica no tema denominado qualidade do serviço, que pode ser traduzida pelos índices que contabilizam o tempo e a frequência em que o consumidor fica sem energia elétrica (Dugan *et al.*, 2003).

Além disso, existem índices que avaliam a continuidade no fornecimento de energia como o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), conforme descrito pelo PRODIST – Módulo 8 da ANEEL (ANEEL, 2009).

A identificação, localização e classificação, as quais podem ser coletivamente chamadas de processos de detecção de faltas, constituíram-se ao longo dos anos em metas almejadas por diversos segmentos do sistema elétrico de potência, tais como o setor de transmissão e o segmento de distribuição de energia elétrica, destacando-se três linhas de pesquisa: i) estudo das formas de onda fundamentais de corrente e tensão, principalmente por medições de impedâncias; ii) estudo de ondas viajantes e componentes de alta frequência; iii) aplicação de sistemas inteligentes (Tang, 2000).

Assim, em função da declarada demanda por sistemas automáticos capazes de identificarem, classificarem e localizarem faltas em sistemas de energia elétrica, diversas proposições de trabalhos que fazem uso das mais distintas ferramentas são observados junto à literatura correlata, nas mais variadas conjunções, com o intuito de contribuir à concretização das bases envolvidas com o trinômio identificação-classificação-localização de faltas.

A introdução da comunicação entre os dispositivos e também dos relés numéricos, uma tônica desde meados dos anos 70, permitiu melhorar a resposta do sistema frente a uma falta, como pode ser observado em Cong *et al.* (2005), onde os autores adotaram uma postura totalmente automatizada para o tratamento de uma falta. Esta linha de pesquisa fornece subsídios ao debate a partir do momento em que há ainda uma grande dificuldade em se adaptar os sistemas automáticos de tratamento de faltas às condições peculiares de cada circuito de distribuição.

Diversas pesquisas têm sido realizadas objetivando o desenvolvimento de esquemas de automatização eficientes de processos envolvidos com a detecção de faltas em sistemas de distribuição. A utilização recente de técnicas de sistemas inteligentes visando tratar tanto o problema de identificação de faltas como a classificação e localização das mesmas têm sido uma tônica nos processos investigativos desses problemas. Os resultados já advindos da aplicação dessas técnicas têm proporcionado a confecção de sistemas de detecção eficientes e robustos.

Complementarmente, as pesquisas envolvendo a proposição de sistemas automatizados para os processos envolvidos com a detecção de faltas, baseados em sistemas inteligentes, têm despertado a atenção da comunidade científica que lida com o assunto. Como por exemplo, pesquisas desenvolvidas nos Estados Unidos mostram a utilização desses sistemas para detectarem faltas de alta impedância (Butler e Momoh, 2000). Os sistemas desenvolvidos foram bastante satisfatórios, obtendo taxas de acerto superiores a 90%. Estudos semelhantes a esses foram também realizados na Coréia (Ko, 1998).

Ainda, em pesquisas realizadas na “*Pacific Gas & Electrical Company*” da Califórnia (Liu e Zhong, 1996), esquemas que utilizam os sinais referentes à ocorrência de uma falta, os quais foram integrados com resultados obtidos de simulação de situações de falta, foi desenvolvido com bastante sucesso. Os resultados finais alcançados pelos sistemas inteligentes obtiveram resultados melhores que aqueles previamente fornecidos por técnicas convencionais, cujos modelos foram desenvolvidos utilizando apenas dados registrados por dispositivos de proteção. Outro método semelhante a este é proposto em Jarventausta *et al.* (1994).

Um dos requisitos para a operação econômica e confiável de um sistema de potência é a determinação exata e em tempo hábil do ponto onde uma falta ocorreu. A localização destas faltas nos sistemas de distribuição de energia elétrica, em geral, é realizada pelo cruzamento das informações fornecidas pelos clientes com a experiência acumulada pelos profissionais da área técnica, os quais são responsáveis pelo despacho das equipes de manutenção aos lugares onde provavelmente a falta ocorreu. Se a estimativa inicial estiver incorreta, então novos lugares candidatos deverão ser investigados pelas equipes responsáveis até que o local da falha seja identificado e os procedimentos de reparo possam ser efetuados.

Atualmente, a competição incremental ocasionada pela regulamentação do setor de energia elétrica aliada à necessidade crescente em fornecer melhores serviços aos clientes, tem contribuído para que as companhias de distribuição de energia elétrica investiguem novos métodos de localização de faltas que sejam mais rápidos e confiáveis que as abordagens convencionais. Outro aspecto motivador que vem impulsionando o desenvolvimento de novas abordagens para identificação e localização de faltas é a possibilidade de otimização dos recursos técnico-financeiros das companhias, bem como a melhoria dos indicadores de eficiência energética do sistema de distribuição.

De uma maneira ampla, as faltas observadas junto aos sistemas de distribuição de energia elétrica podem ser classificadas em faltas de alta impedância e em faltas de baixa impedância.

As faltas de baixa impedância passíveis de ocorrência nos sistemas elétricos de distribuição são as faltas fase-fase e as faltas trifásicas. Estes tipos de faltas se caracterizam por provocarem a ocorrência de correntes com magnitudes suficientemente altas para sensibilizar os dispositivos de proteção instalados ao longo

do alimentador ou junto à subestação. Além destes dois tipos de faltas, as faltas fase-terra de baixa impedância, num sistema de distribuição estrela aterrada podem também ser identificadas pelos dispositivos de proteção do sistema de distribuição. Assim, as abordagens referenciadas na bibliografia correlata, relacionadas às faltas de baixa impedância, procuram, mediante a oscilografia do sistema e do estado dos equipamentos seccionalizadores, localizar dentro do segmento faltoso o local de ocorrência da falta para que as medidas corretivas cabíveis sejam providenciadas.

No entanto, dados estatísticos indicam uma maior probabilidade de ocorrência de faltas de alta impedância junto aos sistemas de distribuição de energia elétrica. As faltas de alta impedância se caracterizam por apresentarem magnitudes de corrente de falta menores que a corrente de carga (trabalho) do alimentador. Assim, os sistemas de proteção convencionais são ineficazes na identificação e consequente atuação junto ao sistema de distribuição frente à ocorrência deste tipo de falta. Como uma consequência direta destas limitações, tem-se que cabos rompidos, encostados no solo, por exemplo, podem permanecer energizados por um longo período. Esta situação ilustrativa pode representar um sério risco, pois pode provocar acidentes envolvendo pessoas e animais ou ainda desencadear incêndios resultando em danos ao meio ambiente, bem como prejuízos de ordem econômica.

Desta forma, as faltas de alta impedância podem ser definidas como um evento anormal sobre um alimentador de distribuição primário que não pode ser facilmente detectado por dispositivos de proteção modernos. A maioria das faltas de alta impedância envolve níveis de corrente muito menores que aqueles necessários à sensibilização dos dispositivos de proteção de corrente. Essas faltas frequentemente exibem arcos voltaicos quando nenhum retorno sólido para a corrente é disponível, resultando em correntes de falta com componentes de alta frequência observáveis.

Como decorrência direta destas faltas, este mesmo comportamento pode resultar de outros eventos, tais como o chaveamento de capacitores e mudanças de tap de transformadores.

Basicamente, existem dois tipos de faltas de alta impedância, quais sejam elas as faltas ativas e as faltas passivas. Uma falta ativa é caracterizada pela presença de arco elétrico junto ao local de ocorrência da falta. A maioria das técnicas propostas na literatura para detectar faltas ativas utiliza inferências que empregam os valores de módulo e ângulo das frequências harmônicas e não harmônicas geradas pela corrente de arco elétrico.

Uma falta de alta impedância passiva é caracterizada pela ausência do arco elétrico. Este tipo de falta pode representar um risco maior visto que o condutor não fornece qualquer indicação visual de uma condição de perigo. Além disso, as faltas passivas são mais difíceis de serem detectadas, pois as informações contidas no espectro harmônico da corrente da falta não são tão evidentes quanto aquelas contidas no espectro harmônico das correntes de falta ativas. Uma visão ampla sobre os principais aspectos relacionados às faltas de alta impedância passiva é apresentada no trabalho de Jota e Jota (2004).

Nas seções seguintes serão apresentadas, em mais detalhes, algumas das principais abordagens para identificação e localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica por meio de técnicas atuais. Dentre estas técnicas, destaque especial será conferido às Redes Neurais Artificiais, aos sistemas de inferência *fuzzy* e às abordagens baseadas na Transformada *Wavelet* devido aos promissores resultados apresentados por essas abordagens e relatados junto à bibliografia correlata.

2.2 Detecção de faltas de alta impedância em alimentadores de sistema de distribuição utilizando redes neurais artificiais

A metodologia proposta aqui foi formulada por Ebron *et al.* (1990), sendo constituída de três etapas principais, as quais são utilizadas para o processo de detecção de faltas em sistemas de distribuição. A primeira etapa consiste em se coletar e processar um conjunto de sinais referentes às correntes de linha do alimentador. A segunda etapa é responsável por empregar este conjunto de medidas para treinar a abordagem neural de maneira que a mesma seja capaz de identificar situações de ocorrência de falta ou condições de operação normal do sistema. Finalmente, a terceira etapa é dedicada aos procedimentos envolvidos com a validação da abordagem neural com dados que não pertenceram ao conjunto de treinamento, de forma a comprovar a eficiência da abordagem frente a novas situações.

Tanto os dados de treinamento como os dados de validação da abordagem neural foram gerados utilizando para tal propósito o programa de simulações de transientes eletromagnéticos EMTP. Diversas simulações foram executadas envolvendo diferentes situações de transitórios, tais como simulações de acionamento de motores e de energização de capacitores. Quatro tipos de casos foram gerados que podem ser listados da seguinte forma:

- Casos de chaveamento normal de cargas;
- Casos de carga normal com chaveamento de capacitores;
- Casos de falta de alta impedância com chaveamento de cargas;
- Casos de falta de alta impedância com chaveamento de carga e de capacitor.

As amostras de corrente empregada no treinamento da rede foram inicialmente separadas dentro de conjuntos de um único ciclo cada. Para cada conjunto, 20

parâmetros foram computados para representar a condição do alimentador perante o ciclo de operação. Dentre estes parâmetros, podem-se listar os seguintes:

- O valor de pico da corrente transitória nas três fases;
- O valor da corrente antes e imediatamente após a ocorrência do maior transitório;
- O número de transitórios caindo abaixo de 75% do valor máximo;
- A magnitude da corrente de sequencia positiva;
- O nível de desequilíbrio entre as fases;
- As componentes harmônicas de primeira, terceira e quinta ordem da corrente de neutro.

Vários desses parâmetros, tais como a corrente de sequencia positiva, são somente empregados para propósitos de referência, pois desta maneira, permite-se que a rede neural possa fazer comparações entre os níveis de corrente transitória e outros parâmetros a fim de que a mesma possa extrair ponderações relativas às perturbações.

2.3 Técnicas de identificação de faltas de alta impedância

utilizando redes neurais artificiais e transformada de Fourier

Conforme mencionado anteriormente, as faltas de alta impedância são geralmente difíceis ou impossíveis de serem detectadas com dispositivos de proteção de sobrecorrente (relés, elos fusíveis e religadores), pois a corrente de falta pode não possuir magnitude suficientemente alta para ativá-los, dificultando assim a discriminação entre as correntes de carga e correntes de falta de alta impedância principalmente nos sistemas de distribuição multi-aterrados.

O método proposto em Ko et al. (1998) para detecção de faltas de alta impedância consistiu também em utilizar Redes Neurais Artificiais do tipo *perceptron* para identificar a ocorrência ou não de faltas. A metodologia opera dividindo inicialmente um ciclo da forma de onda de corrente e tensão dentro de quatro janelas iguais, sendo duas localizadas em posições contendo os valores mais altos de tensão, e as outras duas estando localizadas junto aos valores mais baixos de tensão. Uma ilustração deste procedimento é apresentada na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Configuração da janela de dados. Adaptado de Ko et al., 1998.

Para detectar as componentes de alta impedância da corrente de falta, aplica-se a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*) nos sinais de corrente em cada uma das quatro janelas. Em seguida, as harmônicas fornecidas pela FFT são utilizadas como variáveis de entradas de uma rede neural do tipo *perceptron*. Baseado nas informações de entrada, a saída da rede fornece como resultado o valor +1 quando há ocorrência da falta de alta impedância, fornecendo o valor -1 quando o sistema opera em condições normais.

A rede *perceptron* utilizada neste método é composta de três camadas neurais, tendo oito neurônios na primeira camada, dezesseis neurônios na segunda camada e um neurônio na camada de saída. As entradas da rede são as magnitudes das sete primeiras harmônicas do espectro de frequência, as quais são fornecidas pela aplicação da *FFT*. O tempo de amostragem dos dados do sinal ficou em 260 μ s (64 pontos por ciclo) ou 3840 amostras por segundo.

2.4 Abordagem neural utilizando características estatísticas das correntes de falta

Um fato observável em faltas que exibem uma baixa corrente é que as mesmas normalmente apresentam grandes magnitudes nos sinais de tensão de fase. Entretanto, há uma alteração destacável no formato de onda da corrente na fase faltosa (Butler *et al.*, 1997). Para condições de faltas sem a presença de arco, a amplitude e/ou fase da corrente na fase faltante implica em alterações determinísticas, enquanto que nas condições de falta com presença de arco, distorções aleatórias em intervalos intermitentes podem ser observadas na fase ou na amplitude da corrente da fase faltante. Na presença de um distúrbio devido à ocorrência de falta, as formas de onda das correntes de fase e de neutro apresentam-se distorcidas. Assim, a forma de onda de uma corrente faltosa i_p pode ser representada pela corrente i'_p definida em (2.1) em adição ao distúrbio provocado pela falta, ou seja:

$$i'_p(t) = i_p(t) + n(t) \quad (2.1)$$

onde $n(t)$ representa um processo aleatório. No entanto, nas abordagens convencionalmente empregadas, tanto academicamente como tecnicamente, não contemplam os distúrbios gerados na forma de onda de tensão. A fim de garantir uma maior confiabilidade das estimativas realizadas, a distorção na forma de onda de

tensão será considerada ao longo da apresentação da metodologia proposta por Butler et al. (1997). A

Figura 2.2 apresenta formas de onda de tensão e de corrente para um sistema elétrico sob falta fase-terra de alta impedância com presença de arco elétrico.

Figura 2.2 – Formas de onda de corrente e tensão para uma falta fase terra com ocorrência de arco elétrico. Adaptado de Butler et al. 1997.

Pode-se observar por intermédio dos gráficos da Figura 2.2 a constante alteração de formato de onda a cada ciclo tanto para as formas de onda de tensão como para as formas de onda de corrente. A assimetria de formato das formas de onda no domínio do tempo torna complexa a tarefa de extração de características que permitam ajustar corretamente o sistema de identificação de faltas. No entanto, quando a análise espectral de frequência é realizada sob os dados disponíveis, periodicidades ocultas ou pequenos picos de energia em determinadas frequências podem ser observados. Assim, o levantamento destas peculiaridades do domínio da frequência pode contribuir positivamente para a detecção de eventuais falhas junto ao sistema de distribuição de energia elétrica.

O método de diagnóstico de falta utilizado nesta abordagem consiste em aplicar a capacidade de reconhecimento de padrões oferecido pelas Redes Neurais Artificiais com o objetivo de detectar faltas de baixa e alta impedância, na presença de

arco, em sistemas aterrados ou não aterrados, que são normalmente não detectadas por dispositivos de proteção de sobrecorrente em virtude da baixa magnitude das mesmas.

De forma geral, pode-se caracterizar esta abordagem por meio de duas etapas principais. A primeira etapa é responsável por realizar um pré-processamento de sinais e a segunda etapa é constituída por um sistema de diagnóstico baseado em clusterização supervisionado. As entradas do sistema de diagnóstico de faltas são as três correntes de fase medidas em cada alimentador. O alimentador da subestação monitora as tensões e correntes fornecidas pelos dispositivos de proteção do sistema. O pré-processador computa as características estatísticas vindas das correntes de fase passando as mesmas para o classificador neural de padrões. A Figura 2.3 ilustra o diagrama de blocos deste método de diagnóstico de faltas.

Figura 2.3 – Diagrama de blocos do método de diagnóstico de faltas baseado em características estatísticas das correntes de falta. Adaptado de Butler e Momoh, 1993.

As características pertinentes à forma de onda são fundamentais para se determinar o tipo de metodologia a ser empregada na análise em frequência das formas de onda oscilografadas. Uma vez que os dados obtidos estão comprometidos por um ruído branco, o emprego da transformada de Fourier torna-se inadequada (Butler e Momoh, 1993). Desta maneira, o emprego de técnicas de processamento

estatístico se configura mais adequado aos propósitos do problema de identificação de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Dentre as diversas metodologias disponíveis para se realizar a análise espectral estatística destaca-se a abordagem onde o conceito de análise espectral pela máxima entropia é formulado (Ulrych e Bishop, 1975). Aplicando-se este conceito à análise espectral verifica-se que tal procedimento pode ser representado como sendo um processo gaussiano estacionário, ou seja:

$$H = \frac{1}{4f_n} \int_{-f_n}^{f_n} \log[S(f)] df \quad (2.2)$$

onde f_n é a frequência de Nyquist. Reescrevendo a expressão (2.2) em termos da autocorrelação do sistema, tem-se:

$$H = \frac{1}{4f_n} \int_{-f_n}^{f_n} \log \left[\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \phi(k) \exp(-j2\pi k \Delta t) \right] df \quad (2.3)$$

Maximizando (2.3) com relação aos termos $\phi(k)$ desconhecidos e respeitando as restrições impostas por $S(f)$, onde se deve observar a consistência das autocorrelações $\phi(0) \dots \phi(M-1)$, tem-se a função densidade espectral. Para um processo linear x a função densidade espectral estimada pode ser representada da seguinte forma:

$$\hat{S}_x(t) = \frac{P_m}{2B \left[1 + \sum_{m=1}^M a_m \exp(-j2\pi m f \Delta t) \right]^2} \quad (2.4)$$

onde P_m é a potência normalizada do filtro de ordem m e, B é a largura de banda do processo estocástico x .

Um dos principais limitantes da aplicação da função densidade espectral conforme apresentado em (2.4) reside na estimação da ordem do filtro de estimação de

erro. No entanto, o critério de estimação do erro final, a qual incorpora o erro quadrático de estimação, mostra-se efetivo na determinação da ordem ótima para o filtro (Akaike, 1968). O erro final de predição pode ser calculado da seguinte forma:

$$EFP(M) = \frac{N + M + 1}{N - M - 1} P_m \quad (2.5)$$

onde N é o número de pontos da forma de onda amostrada.

Por meio do processamento espectral estatístico das formas de onda, as principais características extraídas pelo pré-processador de sinais e empregadas nesta metodologia são as seguintes:

- Matrizes de coeficientes de reflexão;
- Coeficientes de *skewness*;
- Coeficientes de *kurtosis*;
- Coeficientes de potência média.

Cada um dos parâmetros estatísticos empregados nesta abordagem representa quantitativamente características inerentes às formas de onda de corrente e tensão. Os coeficientes de *skewness* fornecem informações estatísticas de terceira ordem e podem ser interpretados como sendo uma medida da assimetria em torno do valor médio das formas de onda das tensões e correntes faltosas, enquanto que os coeficientes de *kurtosis* indicam o quão próximo ou o quão distante a função densidade probabilidade está de uma distribuição gaussiana. Os coeficientes de reflexão são um indicativo da repetibilidade das formas de onda, enquanto que os coeficientes de potência média fornecem à abordagem um patamar referencial para a correta categorização dos eventos.

Para ilustrar como alguns destes parâmetros variam para uma forma de onda de corrente faltosa são apresentados na Figura 2.4 e Figura 2.5 os valores de

skewness e de *kurtosis* para uma corrente de falta e para uma corrente normal ao longo de 14 ciclos.

Figura 2.4 – Skewness para uma forma de onda de corrente faltosa (anormal) e para uma forma de corrente normal. Adaptado de Akaike, 1968.

Figura 2.5 – Kurtosis para uma forma de onda de corrente faltosa (anormal) e para uma forma de corrente normal. Adaptado de Akaike, 1968.

Os resultados fornecidos pela rede neural indicam se um determinado padrão de sinal se deve a uma falta ou não. Se o sinal é detectado como falta, a rede neural adicionalmente classifica o tipo de falta e identifica a fase faltante.

2.5 Modelagem fuzzy aplicada na identificação de faltas de alta impedância com característica passiva

Poucas soluções são apresentadas na literatura correlata com o objetivo de identificar as faltas de alta impedância passiva. Verifica-se, ainda, que a maioria das abordagens referenciadas é baseada na análise do desbalanço de fases dos alimentadores do sistema de distribuição. No entanto, em virtude dos sistemas de distribuição normalmente apresentarem um alto nível de correntes desbalanceadas, verifica-se inúmeras limitações destas metodologias quanto da correta identificação de faltas. Um dos principais fatores que contribuem para o desbalanço natural dos sistemas de distribuição é a grande quantidade de cargas monofásicas (fase-terra e fase-fase) instaladas ao longo da extensão dos alimentadores do sistema.

Para contornar esses problemas, o método abordado por Jota e Jota (1998) consiste no emprego de um sistema *fuzzy* supervisor que periodicamente monitora as correntes e tensões dos alimentadores do sistema de distribuição. A partir dos valores de tensão e corrente observados, o sistema *fuzzy*, por meio de comparações e operadores específicos, realiza inferências que fornecem como resultado a indicação de uma ocorrência ou não de falta no sistema.

No entanto, para que o sistema *fuzzy* opere de maneira a fornecer níveis confiáveis de resposta é necessário que exista um volume adequado de conhecimento acerca do sistema de distribuição a fim de que as comparações e inferências ocorram dentro de universos de discurso com dados normalmente distribuídos. A base de dados responsável por armazenar este montante de informações pode ser construída por diferentes técnicas. Dentre as técnicas mais usuais, duas merecem destaque especial. Uma dessas técnicas consiste na simulação computacional dos possíveis eventos do alimentador. Por meio de simulações exaustivas uma grande quantidade de

informações pode ser computada e, como consequência direta, uma consistente base de dados é construída.

A segunda metodologia usualmente empregada é baseada na aplicação de formas de onda impulsivas no início dos alimentadores e observar as respostas originadas por este procedimento. As ondas impulsivas, que são injetadas no alimentador, viajam ao longo da linha, trazendo informações sobre o status real do alimentador. Após a realização de cada medição, o sinal de resposta é pré-condicionado, convertido para o domínio da frequência e então armazenado junto à base de regras correspondente. As componentes complexas dos sinais pré-processados são então calculadas por intermédio da transformada rápida de Fourier.

Na metodologia apresentada nesta seção a base de dados foi constituída por meio da aplicação de formas de onda impulsivas no início dos alimentadores. No entanto, a adoção desta metodologia deve respeitar importantes requisitos como, por exemplo, levar em consideração todas as possíveis configurações operacionais do alimentador. Para tanto, a equipe responsável pelo planejamento, operação e manutenção do sistema deve fornecer informações relevantes sobre as diversas configurações operacionais possíveis do alimentador.

Com relação à operação do sistema, primeiramente, os sinais das respostas impulsivas são comparados com aqueles conhecidos e armazenados junto à base de regras. Na sequência, o sistema busca por evidências de ocorrências de faltas de alta impedância, considerando para tanto o grau de discrepância entre os sinais medidos e as respostas armazenadas na referida base de dados. Como resposta, o sistema *fuzzy* é responsável por fornecer indicadores de supervisão dos estados do sistema de distribuição.

Análises de respostas típicas têm mostrado que a utilização de 20 frequências características é suficiente para discriminar satisfatoriamente os sinais medidos. As respostas dos sinais impulsivos (5000 amostras) são descompostas em duas janelas W_1 e W_2 . Para cada janela, componentes reais e imaginárias das 20 frequências têm sido calculadas, perfazendo assim um total de 80 componentes que serão as entradas do sistema *fuzzy*.

2.6 Método para diagnóstico de faltas em subestações de distribuição utilizando sistemas fuzzy e redes de causa e efeito

A estrutura para o diagnóstico de falta proposto por Chen *et al.* (2000) é compreendida por uma rede de causa e efeito, uma base de regras, uma base de dados *fuzzy*, um mecanismo de inferência e um processador de dados em tempo real. Um diagrama esquemático do sistema proposto é mostrado na Figura 2.6.

Nesta metodologia, a rede causa e efeito representa a casualidade entre faltas e ações de relés e disjuntores. Para os diversos tipos de faltas, considerando todas as seções possíveis, especificam-se os fluxogramas que representam as sequencias de causa e efeito.

Figura 2.6 – Estrutura do sistema de diagnóstico de falta proposto.
Adaptado de Chen et al., 2000.

A outra tarefa do método proposto é classificar os tipos de faltas, levando em consideração as correntes e tensões no alimentador, através da utilização de um sistema *fuzzy*. A base de regras *fuzzy* é formada por regras que são extraídas a partir de características de todos os tipos de faltas. A definição dessas regras requer um conhecimento detalhado do comportamento dos sinais de corrente e tensão que são gerados durante uma situação de falta. As regras *fuzzy* desta abordagem são baseadas na premissa de quando uma falta ocorre, as correntes normalmente aumentam em magnitude e as tensões diminuem. O formato das regras do sistema *fuzzy* possui o padrão apresentado na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Exemplo de base de regras do sistema *fuzzy*. Adaptado de Chen et al., 2000.

O processo de identificação da falta pelo sistema *fuzzy* consiste de quatro estágios que podem ser representados esquematicamente conforme apresentado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Procedimentos para estimação de faltas para o sistema de inferência fuzzy.
Adaptado de Chen et al., 2000.

Conforme apresentado na Figura 2.8, o primeiro passo deste processo é a obtenção das correntes e tensões do alimentador. O segundo passo consiste em converter esses valores para os respectivos termos linguísticos que são especificados através de funções de pertinência. Em seguida, esses termos linguísticos serão empregados na avaliação das regras *fuzzy*. Finalmente, através da aplicação dos procedimentos de inferência, torna-se possível a obtenção dos resultados que permitam identificar o tipo de falta.

2.7 Técnicas de localização de faltas baseadas em sinais de alta frequência e transformada wavelet

Uma técnica proposta por Magnago e Abur (1999) para localização de faltas em alimentadores de distribuição radial é formulada sob as informações fornecidas pelos equipamentos de medição instalados na subestação, levando-se também em consideração detalhes de configuração do alimentador.

O método proposto, opera identificando o trecho da falta com base nas informações das ondas tráfegantes fornecidas pelas componentes de alta frequência, as quais estão intrínsecas nos transitórios dos sinais de faltas coletados pelos instrumentos de medição. Em seguida, é calculado, baseado nas intensidades dos sinais de frequência, o local exato da falta ao longo do trecho identificado no passo anterior.

Para tanto, os sinais transitórios das correntes trifásicas são inicialmente decompostos em suas componentes modais. Em seguida, os sinais modais são decompostos em suas componentes *wavelets*, sendo obtidos então os correspondentes coeficientes *wavelets*. Esses coeficientes são usados para extrair padrões relevantes dos sinais, os quais são subsequentemente utilizados para identificar o ramo ou trecho onde a falta está localizada. Finalmente, a distância da falta a partir da subestação principal é calculada utilizando informações baseadas nas potências dos sinais.

A fim de ilustrar esta metodologia, a Figura 2.9 apresenta o diagrama de blocos funcionais da abordagem descrita nesta seção.

Figura 2.9 – Fluxograma do algoritmo de localização de falta proposto. Adaptado de Magnago e Abur, 1999.

Em suma, o procedimento de localização de faltas pode ser descrito da seguinte forma:

- As tensões e correntes de fase são transformadas para o domínio modal.
- Os sinais modais são decompostos visando obter os Coeficientes da Transformada *Wavelet* (CTW).
- O trecho e a distância à falta é estimado utilizando informações fornecidas pelos coeficientes da Transformada *Wavelets*.

Um dos aspectos observados neste método está relacionado à ocorrência de faltas fase-terra. Se a falta é produzida quando a tensão da fase faltante é pequena,

isto é, o ângulo de incidência é pequeno, os sinais transitórios produzidos pelas ondas tráfegantes também serão pequenos. Entretanto, mesmo para os ângulos de incidência pequenos, os coeficientes da Transformada *Wavelet* identificam o trecho sob falta, pois se pôde observar que este processo opera sob um mapeamento linear.

2.8 Classificação e medição dos níveis de perturbação em sistema de potência por meio de wavelet

O método proposto na abordagem apresentada em Gaouda *et al.* (2002) consiste em utilizar a técnica de *wavelets* para detectar, classificar e medir as perturbações que incidem nos sistemas de distribuição.

Um sinal $f_s(t)$ de duração finita com uma distorção aditiva $s_d(t)$ pode ser representado matematicamente por:

$$f_s(t) = f_p(t) + s_d(t) \quad (2.6)$$

onde $f_p(t)$ é o sinal puro que está compondo $f_s(t)$ e $s_d(t)$ representa o sinal de distúrbio inserido ao sinal original.

Aplicando análise multi-resolução é possível decompor o sinal $f_s(t)$ em diferentes níveis de resolução e apresentá-lo na forma de uma expansão por série utilizando uma combinação de funções escalas $\varphi_k(t)$ e funções *wavelets* $\psi_k(t)$. Formalmente, pode-se representar esta decomposição na sua forma canônica pela seguinte equação:

$$f_s(t) = \sum_k c_0(k) \cdot \varphi(t-k) + \sum_k \sum_{j=0}^{k-1} d_j(k) \cdot 2^{\frac{j}{2}} \cdot \psi(2^j t - k) \quad (2.7)$$

onde j representa o número total de níveis de resolução, $c_j(k)$ são os coeficientes da função escala e $d_j(k)$ são os coeficientes da função *wavelets*. Os coeficientes de escala $c_j(k)$ são obtidos a partir do sinal. Se a taxa de amostragem do sinal $f_s(t)$ estiver acima

da taxa de amostragem determinada pelo Teorema de Nyquist, então os mesmos são boas aproximações para os coeficientes de escala para uma determinada escala. Isto significa que nenhum coeficiente de escala será necessário.

Assim, quaisquer alterações no sinal $f_s(t)$ podem ser detectadas e localizadas no tempo devido às mudanças nas magnitudes desses coeficientes. De acordo com o teorema de Parseval, a energia de $f_s(t)$ poderá ser particionada em diferentes caminhos dependendo do tipo de evento associado à distorção. Portanto, o mapeamento dos dados da distorção $s_d(t)$ dentro de um domínio *wavelet* é o primeiro passo para executar o processo de classificação dos sinais. Em seguida a distribuição da energia de distorção E_d em diferentes níveis de resolução é computada para gerar um conjunto de características não variantes no que diz respeito à mudança de posição (translação) com baixa dimensionalidade.

A Figura 2.10 apresenta a diferença na distribuição de energia ΔE_d em diferentes níveis de resolução para 25 sinais distorcidos por diferentes perturbações.

Figura 2.10 – Classificação de perturbações no domínio wavelet.
Adaptado de Gaouda et al., 2002.

Podem-se observar por intermédio do gráfico da Figura 2.10 que as características de perturbações envolvendo harmônicas no sistema são melhores identificadas no nível 5, enquanto que afundamento e elevação de tensão são melhores reconhecidos no nível de resolução 7.

A Figura 2.11 ilustra em detalhes um sinal $f_s(t)$ constituído de diversas perturbações, ilustrando a decomposição do sinal no primeiro nível D_1 , bem como ΔE_d nos diferentes níveis de resolução.

Figura 2.11 – Ilustração de um sinal composto por diversas perturbações e sua representação no domínio wavelet. Adaptado de Gaouda et al., 2002.

Portanto, a partir da utilização desta técnica, diversas distorções nos sinais de medição podem ser detectadas através da utilização dos coeficientes *wavelets* em diferentes níveis de resolução. A energia associada à distorção em diferentes níveis de resolução é empregada como um vetor discriminante que pode classificar diferentes perturbações.

2.9 Detecção de distúrbios em sistemas de distribuição utilizando *wavelet*

Existem eventos no sistema de distribuição que geram transitórios que são ocasionados pela energização das próprias cargas instaladas no sistema, como por exemplo, a energização de capacitores e o acionamento de máquinas de elevada potência. Nesses casos, mesmo que os distúrbios de tensão ultrapassem momentaneamente os limites normais que foram pré-estabelecidos para as cargas, nenhuma medida operacional é necessária, pois as oscilações são originadas pelas próprias particularidades do sistema.

Contrariamente, no caso de distúrbios de tensão provocados por eventos associados aos diversos tipos de faltas, há então a necessidade de realizar ações operacionais que levem à isolação da mesma. Portanto, a investigação de técnicas que permitam a classificação rápida desses eventos torna-se de suma importância para o incremento da qualidade e confiabilidade do sistema.

O objetivo do método proposto por Karimi *et al.* (2000) consiste na aplicação de transformadas *wavelets* para a detecção de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição, bem como a identificação do tipo de evento transitório que resultou a respectiva perturbação.

O diagrama de blocos apresentando o esquema de detecção e classificação de distúrbios é ilustrado na Figura 2.12. Esta metodologia é composta por quatro blocos principais, sendo eles a geração do sinal de erro, a análise do sinal de erro usando *wavelets*, a extração de características e o suporte à decisão.

Figura 2.12 – Diagrama de blocos do esquema de detecção proposto.
Adaptado de Karimi et al., 2000.

O bloco dedicado à geração do sinal de erro extrai as distorções superpostas nas tensões medidas, gerando um sinal de erro por intermédio de um filtro adaptativo conforme apresentado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Diagrama de blocos representando o filtro adaptativo.
Adaptado de Karimi et al., 2000.

O filtro rastreia a amplitude (θ_1) e o ângulo (ϕ_1) da componente fundamental do sinal de entrada, sendo o comportamento dinâmico do filtro é descrito por:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = -2\mu_1 \cdot \sin(\phi_1) \cdot e(t) \\ \dot{\phi}_1 = -2\mu_2 \cdot \theta_1 \cdot \cos(\phi_1) \cdot e(t) + w_0 \end{cases} \quad (2.8)$$

O sinal de erro $e(t)$ é obtido subtraindo a componente fundamental do sinal de entrada. Esta é a principal vantagem de usar este filtro no algoritmo.

O bloco responsável pela análise por *wavelets* transforma o sinal de erro em diferentes escalas no domínio da frequência. A Transformada *Wavelet* fornece informações sobre o conteúdo das frequências de um sinal da mesma forma com que faz a transformada de Fourier. Entretanto, diferentemente da transformada de Fourier, a Transformada *Wavelet* é capaz de focar componentes de alta frequência em curtos intervalos de tempo, bem como componentes de baixa frequência presentes em longos intervalos. Portanto, torna-se uma ferramenta adequada para análise de transitórios de alta frequência na presença de componentes de baixa frequência.

O objetivo do bloco de extração de características é identificar assinaturas específicas dos diversos tipos de perturbações atuando no sistema. A Transformada *Wavelet* decompõe o sinal de erro dentro de diferentes escalas de frequência. Cada escala representa o sinal de erro na banda correspondente. O conteúdo de energia dos sinais da escala relativo aos sinais de erro se altera dependendo do tipo de perturbação. Portanto, a amplitude relativa dos sinais da escala com relação ao sinal de erro é selecionada como características discriminantes.

Finalmente, a função do bloco de apoio à decisão é discriminar tipos de distúrbios tão precisamente quanto possível. Uma função probabilidade é definida para as características, e a decisão é realizada utilizando o critério de máxima verossimilhança. Este critério é baseado na maximização da função probabilidade das características.

2.10 Modelagem de faltas de alta impedância baseada na teoria de arcos elétricos

A simulação de chaveamentos de bancos de capacitores em programas como *Electromagnetic Transients Program - EMTP* e *MatLab/SimPowerSystems* são bem próximos da realidade e os resultados fornecidos tem um alto grau de precisão quando o sistema é modelado de forma adequada.

No entanto, a modelagem dos fenômenos que simulam o comportamento de faltas de alta impedância é complexa, pois, em função da presença do arco elétrico cuja natureza é bastante complexa e diversa, acarreta em um esforço extra durante a fase de confecção do sistema equivalente.

Desta forma, a investigação de um modelo geral que represente de forma realista a falta de alta impedância é de suma importância para a pesquisa de métodos de detecção de falta de alta impedância, bem como para o projeto de equipamentos de proteção.

Alguns modelos de falta de alta impedância utilizam para propósitos de simulação a inclusão de uma resistência ou modelo de impedância não linear na rede no ponto de falta. O método proposto por Chan *et al.* (1998) é baseado na teoria de arco voltaico, onde um modelo realista englobando impedância não linear, fonte de tensão variante no tempo, cujos chaveamentos são controlados por um *TACS* (*Transient Analysis Control System*) que é empregado com a finalidade de trazer às simulações um maior grau de fidelidade. A Figura 2.14 ilustra o diagrama esquemático do circuito elétrico dedicado à modelagem física do arco elétrico. As chaves 1 e 2 são chaves convencionais com controle temporal que isolam o alimentador da carga conectando-o ao caminho da falta. A chave 3 é uma chave controlada por um *TACS* que simula a reignição e extinção do arco.

Figura 2.14 – Diagrama de blocos de modelo da falta de alta impedância.
Adaptado de Chan et al., 1998.

Sua operação depende da comparação de tempo entre os parâmetros de simulação T_a e Δt . O parâmetro T_a é o tempo para a reignição do arco a partir do momento que a tensão aplicada passa por zero e Δt é o tempo de condução do arco em meio ciclo, sendo esses parâmetros dados por:

$$T_a = \frac{1}{w} \sin^{-1} \frac{V_r}{V_m} \quad (2.9)$$

$$\Delta t = \frac{\pi \cdot V_r + 2\sqrt{V_m^2 + V_r^2}}{w \cdot (V_a + V_r)} \quad (2.10)$$

onde V_r é a tensão de reignição do arco, V_m é o valor de pico da tensão aplicada e V_a é a tensão de arco, sendo que a tensão aplicada é assumida como:

$$v = V_m \cdot \sin(\omega t) \quad (2.11)$$

A resistência não linear R controla a magnitude da corrente de falta e é conectada à parte de condução do arco que consiste de dois diodos D_1 e D_2 e duas fontes de tensão S_1 e S_2 . Essas fontes possuem formato de onda tipo dente de serra com linearidade crescente e decrescente, as quais podem representar a característica dinâmica $v-i$ do arco melhor que fontes DC e ajustar a diferença de fase entre a tensão aplicada e a corrente de falta.

2.11 Localização de faltas por meio de redes neurais artificiais e da transformada de Clarke-Concórdia

A localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica diretamente aterrados pode ser realizada de maneira semelhante à localização de faltas em sistemas de distribuição com alta impedância de aterramento. No entanto, devido às peculiaridades das formas de onda de tensão e corrente, novas técnicas de pré-processamento de sinais devem ser incorporadas.

Dentre as técnicas de pré-processamento usualmente empregadas nos diversos trabalhos verificados junto à bibliografia correlata, destaca-se o emprego da análise fasorial dos sinais em conjunto com Redes Neurais Artificiais (Martins *et al.*, 2002).

No entanto, devido à complexidade do processo de localização de faltas, observa-se a necessidade de se incorporar novas técnicas de processamento às técnicas convencionais. Nesta seção, será apresentada a metodologia de localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica diretamente aterrados

empregando a transformada de Clarke-Concórdia em conjunto com abordagens que empregam a teoria dos autovalores.

A principal vantagem observada quando da aplicação desta técnica reside no fato de que a mesma é imune às interferências harmônicas e de sinais ruidosos uma vez que a localização das faltas é realizada com base na comparação de padrões por meio de uma rede neural artificial do tipo *perceptron* multicamada.

A Transformada de Clarke constitui-se em uma metodologia para desacoplamento paramétrico para sistemas trifásicos. As duas componentes estacionárias de corrente são denotadas por α e β . A terceira variável originada desta transformação é conhecida por componente de sequencia zero. A fim de se desenvolver uma metodologia destinada à operação em tempo real de sinais, torna-se conveniente uma alteração da transformada original de Clarke. Dentre as possíveis alterações existentes, destaca-se a Transformada de Clarke-Concórdia (Faria, 2000). O desenvolvimento teórico desta modificação é realizado supondo-se que a componente α da transformada original está sobreposta à corrente da primeira fase do sistema trifásico. Desta maneira, verifica-se que a componente β estará atrasada em relação à α de $\pi/2$ radianos. A matriz de transformação proposta pode então ser definida da seguinte forma:

$$\mathbf{T}_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Desta maneira, é possível caracterizar cada um dos estágios de falta por meio da análise das componentes de corrente i_α , i_β e i_0 . Essas componentes de corrente podem ser obtidas por meio da seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_c \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

onde i_1 , i_2 e i_3 são respectivamente as correntes de cada uma das fases do sistema de distribuição.

Com a finalidade de se extrair as principais características das componentes i_α , i_β e i_0 é conveniente a análise dos autovetores e autovalores da matriz de correlação de dados.

A arquitetura neural proposta nesta seção para localização de faltas possui como entradas os autovalores da matriz de correlação, bem como o tipo de falta identificado durante a fase de pré-processamento dos sinais. O diagrama esquemático da estrutura neural sugerida é apresentado na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Diagrama esquemático do sistema de localização de faltas por meio de redes neurais artificiais. Adaptado de Faria., 2000.

Para ilustrar a variação da distância de falta em função dos autovalores para diferentes tipos de falta, a Figura 2.16 apresenta o gráfico da distância em função dos autovalores.

Figura 2.16 – Distância de falta em função dos autovalores. Adaptado de Faria., 2000.

2.12 Tratamento automatizado de faltas em linhas de distribuição

Nesta seção é apresentada uma nova estratégia de gerenciamento de faltas em sistemas de distribuição, usando informações vindas dos diversos dispositivos instalados no circuito, realizando-se assim uma coordenação entre os mesmos.

O método tradicional para o tratamento de uma falta em uma linha de distribuição é por tentativa e erro, onde as seções dos alimentadores são energizadas uma a uma até que nenhum sinal de falta seja identificado pelos relés. Através de disjuntores e chaves seccionadoras, consegue-se este tipo de operação que na maioria das vezes ocorre de forma manual. Nestas situações a localização rápida e precisa da falta diminui o tempo em que o sistema fica desenergizado.

Com a introdução de relés numéricos e também da comunicação entre os dispositivos, tornou-se possível melhorar a resposta do sistema frente a uma falta. No entanto, há uma forte discussão entre os pesquisadores no sentido de que o comando

final na proteção dos sistemas de distribuição deve ficar a cargo de um operador especialista ou totalmente automatizado. Tal ceticismo por parte das metodologias totalmente automatizadas se deve à grande dificuldade em se adaptar os diversos sistemas de controle às peculiaridades de cada circuito de distribuição.

O modelo de tratamento de faltas investigado por Lehtonen *et al.* (2000) adota uma postura totalmente automatizada para localização de faltas, isolamento dos setores faltosos e restauração do fornecimento de energia. Para tal, o modelo computacional trabalha integrado ao sistema SCADA e também com os dispositivos de automação de um sistema de distribuição georeferenciado.

O tratamento das faltas neste modelo se inicia pela etapa de localização da mesma, que é realizada por meio de três técnicas distintas. Após a ocorrência de uma falta, valores de correntes medidos são confrontados com valores armazenados para estimar o ponto em que a mesma ocorreu. Em seguida, tais informações são confrontadas com os sinais enviados pelos Indicadores de Faltas instalados ao longo do alimentador e que possuem capacidade de comunicação. Visando refinar a resposta, utiliza-se das informações estatísticas sobre a ocorrência de faltas nos trechos identificados pelo software de localização e pelos Indicadores de Faltas.

Os setores faltosos são automaticamente isolados por meio de chaves acionadas por controle remoto. Os setores não afetados pela falta são então energizados. Durante o processo de restabelecimento são efetuados cálculos para se determinar a capacidade real de fornecimento do sistema após a falta, bem como os limites térmicos das linhas com base no carregamento do circuito. A integração do modelo com o sistema SCADA pode ser observada na Figura 2.17.

Figura 2.17 – Modelo computacional para automatização do tratamento de faltas em sistemas de distribuição. Adaptado de Lehtonen et al., 2000.

O sistema *AM/FM/GIS* (*Automated Mapping, Facilities Management and Geographic Information System*) é responsável por realizar diversas tarefas no processo de automatização, indo desde a estimação do estado atual da rede até os cálculos envolvendo os diagnósticos das faltas. Este sistema tem comunicação bidirecional com o *SCADA*, que recolhe informações vindas dos dispositivos, tais como chaves, disjuntores, medidas diversas da rede e o controle sobre os dispositivos que detectam as faltas.

Neste modelo automatizado até mesmo o fato de parte da rede possuir indicadores de falta, e parte não possuir, é levado em consideração, modelando-se matematicamente as zonas de atuação. O principal benefício para a automatização da isolação de uma falta é a diminuição de custo ao consumidor. Além de reduzir o número de seguidas interrupções em consequência da localização errônea de uma falta.

Outra aplicação envolvendo a integração do sistema *SCADA* para automação do tratamento de faltas pode ser contemplada em Tannlund e Bjorkman (2000). Nesta aplicação é descrito um sistema de distribuição de energia automatizado que adota, dentre outros parâmetros, a utilização de Indicadores de Faltas instalados em determinados ramos do sistema para tomada de decisão.

Nesta mesma linha de pesquisa é possível se encontrar trabalhos que utilizam sistemas computacionais para automatização de procedimentos envolvendo localização de faltas fundamentados em computadores pessoais (Choi *et al.*, 1999), como é o caso do *KODAS* (Sistema Automático de Distribuição da Coreia) (Cho E Há, 1998).

2.13 Considerações parciais

Abordando a pesquisa bibliográfica realizada em bases técnico-científicas em busca de trabalhos que contemplem metodologias de detecção de faltas em sistemas de distribuição, constata-se aqui o empenho de pesquisadores de vários países em se solucionar o problema.

De fato, o problema é complexo e apresenta inúmeros desafios, principalmente quanto à generalidade da ferramenta a ser desenvolvida, frente às mais variadas situações de carga e faltas inerentes aos sistemas de distribuição. Sua complexidade também se reflete nos poucos trabalhos relevantes que são encontrados, em que houve realmente a implementação prática em sistemas de distribuição reais.

3. Propostas Modernas para Detecção de Faltas em Sistemas de Distribuição

3.1 Introdução

Ao longo do Capítulo 2 foram apresentadas diversas abordagens já consideradas clássicas, propostas em literatura técnico-científica, para agregar confiabilidade no processo de detecção de faltas. Apesar de se observar um grande número de aplicações, vindas de diversos países, destaca-se um número limitado de trabalhos que realmente são promissores e passíveis de agregação de valores para o objetivo final desta tese.

A seguir será apresentada uma coleção de trabalhos científicos mais contemporâneos que propõem metodologias para a identificação e localização de faltas, sendo que as mesmas foram divididas em “Propostas Convencionais” e “Propostas Inteligentes”.

3.2 Propostas convencionais para a detecção de faltas

As técnicas convencionais para a detecção de faltas em sistemas de distribuição têm contribuído de maneira interessante, especialmente na etapa de pré-processamento dos dados e correlações feitas com informações sobre a arquitetura dos alimentadores e medições tomadas da rede.

3.2.1 Localização de faltas em sistemas de distribuição utilizando análise multiresolução de transformadas *wavelets*

Analizando-se a literatura correlata às técnicas de localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica, verifica-se que grande parte destas faz uso das Transformadas *Wavelet* durante a etapa de pré-processamento dos dados, com o intuito de extrair (do sinal original) características que possam ser empregadas durante o processo de localização da falta. Desta forma, cabe comentar que em um dos trabalhos mais promissores e recentes da área (Borghetti *et al.*, 2010), os autores realizam uma decomposição Multiresolução *Wavelet* (tempo-frequência) sobre os sinais transitórios que estão associados com as ondas viajantes provenientes da falta.

A análise no domínio do tempo e da frequência através de decomposição *Wavelet* foi empregada para melhorar a precisão de identificação das frequências associadas com os padrões de localização de faltas utilizados nas análises no domínio da frequência apenas.

Durante a etapa de testes do método, os autores desenvolveram uma configuração laboratorial de forma a simular um modelo reduzido de um alimentador monofásico. Neste ensaio, foram empregados cabos do tipo blindado, um gerador de função (representando a fonte de alimentação), um osciloscópio para adquirir e armazenar as medidas, além de uma placa de entrada/saída de alta velocidade (gera a falta no sistema). Entretanto, duas topologias distintas foram configuradas para que os testes fossem devidamente realizados. Nas Figura 3.1 e Figura 3.2, podem-se visualizar ambas as topologias, as quais foram desenvolvidas mantendo-se um fator de escala 1:50.

Figura 3.1 – Modelo reduzido representativo da Topologia 1, a qual possui somente o alimentador principal.

Figura 3.2 – Modelo reduzido representativo da Topologia 2, a qual possui tanto o alimentador principal como um ramo lateral.

Após configurar as topologias de rede previamente apresentadas, as faltas foram geradas e obtidas as formas de onda por meio do osciloscópio alocado no “ponto de medição” destacado nas Figura 3.1 e Figura 3.2. Destas medições, puderam-se observar as formas de onda apresentadas respectivamente pela Figura 3.3 e Figura 3.4.

Figura 3.3 – Forma de onda obtida quando da ocorrência de uma falta na Topologia 1.

Figura 3.4 – Forma de onda obtida quando da ocorrência de uma falta na Topologia 2.

Cabe comentar que depois de realizados os primeiros testes, verificou-se a integridade da simulação em termos do sinal medido após a falta. Assim, toda a metodologia proposta foi aplicada para verificar a eficácia de tal método. Somente após todos estes testes, a metodologia proposta foi aplicada a dados reais de faltas ocorridas em sistemas de distribuição de energia elétrica.

O método proposto neste trabalho foi dividido em duas etapas, sendo que na primeira se realiza a estimação inicial das frequências das ondas viajantes por meio de:

$$f_p = \frac{V}{n_p L_p} \quad (3.1)$$

sendo que V é a velocidade de propagação da onda viajante; n_p é o número de vezes que a onda viajante se propaga pelo trecho p ; e L_p é o comprimento do trecho p .

A partir desta estimativa inicial das frequências, inicializa-se a segunda etapa, onde a finalidade é melhorar a estimação inicial mediante o uso da Transformada *Wavelet*. Por meio desta etapa, além de melhorar a estimação das frequências, também se obtém uma faixa de frequências que delimita a frequência obtida durante a correção da estimativa inicial. Portanto, pode-se dizer que a frequência característica para determinada falta encontra-se dentro desta faixa de frequências.

Os resultados obtidos quando da aplicação desta metodologia sobre o modelo reduzido de alimentador foram considerados satisfatórios, pois, conforme mostrado na Tabela 3.1, os valores das frequências das ondas viajantes obtidas pelo método proposto são bastante próximas às frequências reais das ondas viajantes geradas após a falta.

Tabela 3.1 – Resultados obtidos com a aplicação do método proposto sobre faltas geradas no modelo reduzido de alimentador (Topologia 2).

Trecho	Frequência obtida pelo método (MHz)	Frequência de Referência (MHz)
Nó 01 – 02	2,233	1,980
Nó 01 – 03	4,465	3,922
Nó 01 – 04	5,953	5,844

Cabe comentar que, após a aplicação da estimação inicial de frequência, o erro encontrado com relação à frequência de referência era de 11,3% e, após a aplicação da etapa 2 do método, a correção da frequência apresentou boa eficiência e pôde ser observada a queda do erro da estimação de frequência que atingiu 8,6%.

Portanto, garantindo-se tal eficiência, o método foi aplicado a dados reais de um sistema de distribuição. Assim, observaram-se as seguintes respostas com relação às estimações de frequências (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Resultados obtidos com a aplicação do método proposto sobre dados reais de faltas.

Trecho	Frequência obtida pelo método (MHz)	Frequência de Referência (MHz)
Nó 01 – 02	52,65	50,25
Nó 01 – 03	41,88	38,35
Nó 01 – 04	62,81	62,10
Nó 01 – 05	25,35	25,95
Nó 01 – 06	16,28	18,25
Nó 01 – 07	15,35	13,40
Nó 01 – 08	11,44	

Conforme pode ser visualizado na Tabela 3.2, a estimação das frequências pode ser considerada satisfatória para dados reais e que, para os trechos entre os nós 01-07 e 01-08, observou-se uma mesma estimativa de frequências. Portanto, o método proposto identificou que a falta encontra-se localizada entre os nós 07 e 08. Desta forma, tal metodologia é considerada promissora para o propósito da localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica, a qual identifica de forma consistente o trecho de linha que sofreu a falta. Entretanto, a metodologia foi testada somente em um alimentador com dimensões bem reduzidas, a qual pode se tornar ineficiente para alimentadores maiores.

3.2.2 Metodologia de localização de faltas baseada na arquitetura do alimentador e medidas tomadas na subestação

Além da metodologia supracitada, também podem ser encontrados atualmente na literatura correlata outros tipos de localizadores de faltas promissores. Desta forma, dois autores (Mirzai e Afzalian, 2010) desenvolveram um novo sistema de localização de falta para sistemas de distribuição radiais, o qual se baseia na arquitetura do alimentador e nas medidas de tensão e corrente realizada na subestação.

O algoritmo proposto determina a localização da falta levando-se em consideração a característica de variação do carregamento da rede, condição de desbalanceamento e a natureza assimétrica do alimentador. Neste trabalho, os autores mostram que a variação do carregamento da rede afeta significativamente a precisão do sistema de localização de falta. De forma a contornar tal problema, realiza-se a estimação do carregamento em tempo-real a fim de garantir uma minimização do erro entre a localização da falta calculada e a localização real da falta (valor de referência).

Com o intuito de mostrar a eficácia da metodologia proposta, os autores realizaram testes sobre dados reais de sistemas de distribuição radiais.

Conforme comentado previamente, a metodologia empregada necessita a priori dos valores de carregamento atual do sistema. Assim, a primeira etapa do método é a estimação do carregamento antes da ocorrência da falta. Portanto, este método deve ser implementado junto ao fluxo de carga do sistema de distribuição, onde são calculadas as variações de carregamento com base nos valores de pré-falta e na configuração do alimentador. Desta forma, podem-se calcular também os

valores das impedâncias do sistema durante a pré-falta e que será utilizada durante a etapa de localização da falta.

O carregamento da rede foi considerado como impedância constante e a variação deste carregamento foi calculada por meio da Lei de Kirchhoff das Tensões.

Após esta primeira etapa, deve-se executar então o algoritmo de localização de falta, o qual se baseia no cálculo do funcional (derivadas parciais). Por meio deste cálculo obtém-se o valor da distância entre a subestação e a falta. Entretanto, devido ao sistema de distribuição possuir diversos ramos (característica radial do alimentador), o algoritmo de localização de falta pode fornecer como resposta múltiplos ramos como pontos de ocorrência da falta. Com o intuito de sobrepor este problema, realiza-se uma análise da assimetria dos ramos laterais.

De forma a garantir o bom funcionamento e a validação da metodologia proposta, foram realizados testes iniciais sobre um sistema simulado por meio do *software ATP (Alternative Transients Program)*. Os resultados obtidos para alguns destes testes são apresentados na Tabela 3.3, onde são mostrados apenas testes para faltas fase-terra. No entanto, os autores comentam que os resultados para os demais tipos de faltas são similares.

Tabela 3.3 – Resultados obtidos para faltas fase-terra geradas no início do alimentador.

Caso	Distância obtida pelo método (m)	Distância de Referência (m)
01	4347,5	4342,0
02	5324,6	5317,0
03	5938,0	5929,0
04	6577,8	6558,0
05	7048,0	7029,0
06	8480,2	8455,0
07	8775,2	8750,0
08	9534,3	9506,0
09	10997,9	10969,0
10	13098,5	13098,5

Os resultados supracitados também foram analisados quanto à variação no carregamento do sistema e quanto ao aumento da distância. No caso da variação do carregamento, verificou-se que o erro somente torna-se maior do que 1% quando o carregamento varia em torno de 100% de seu valor nominal. Com relação à variação da distância, o erro somente atingiu 1% após uma distância de 14 km entre a subestação e o ponto de falta.

Verificados os resultados da metodologia sobre o sistema de distribuição simulado, houve a necessidade de se realizar testes sobre dados reais de sistema de distribuição radiais. Estes resultados podem ser visualizados por meio da Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Resultados obtidos para diversos tipos de faltas ocorridas em um sistema de distribuição real.

Tipo de Falta	Distância obtida pelo método (m)	Distância de Referência (m)
Fase-terra	8003	8173
Fase-terra	10708	11074
Fase-terra	5109	5200
Fase-Fase-terra	4735	4816
Fase-Fase	4505	4580
Trifásica	5973	6090

Conforme mostrado pelos autores, os resultados obtidos com a metodologia proposta são satisfatórios. Entretanto, faz-se extremamente necessária a obtenção dos valores de carregamento no momento pré-falta para que se possa ser calculada a impedância do sistema no momento que precede a falta, o qual pode prejudicar o algoritmo de localização de falta caso apresente valores incoerentes.

3.3 Propostas inteligentes para a detecção de faltas

Em literatura científica a respeito da detecção de faltas constata-se uma utilização crescente de ferramentas pertencentes à classe de sistemas inteligentes.

Isto porque determinados tipos de faltas, especialmente aquelas de alta-impedância, são de extrema dificuldade de mapeamento (Mora-Florez *et al.*, 2003).

A seguir, serão apresentados alguns artigos que constituem contribuições pertinentes ao desenvolvimento deste trabalho, especialmente pela combinação de ferramentas de processamento de sinais com Redes Neurais Artificiais e sistemas *fuzzy*, sendo, aliás, tais associações uma tônica para a garantia de sucesso no processo de detecção de faltas.

3.3.1 Estratégia para localização de faltas monofásicas em sistemas de distribuição utilizando sistemas *fuzzy*, *wavelets* e FFT

O trabalho de Mora-Florez *et al.* (2008) contribui com um algoritmo de classificação estatística fundamentado em funções de probabilidades *fuzzy* para localizar faltas monofásicas em sistemas de distribuição, esse trabalho realiza uma combinação interessante de ferramentas para se garantir a localização de seções faltosas em um sistema de distribuição da Colômbia.

As maiores contribuições desta proposta advêm da percepção estatística dos autores com relação às variáveis elétricas passíveis de serem mensuradas do ponto de vista da subestação de distribuição, tomando leituras de correntes vindas de TC's (transformadores de corrente) e tensões vindas de TP's (transformadores de potencial).

Os autores combinaram uma variante de sistemas *fuzzy* para uso estatístico, transformadas *Wavelet* e Transformada Rápida de Fourier (*FFT*), aplicando tais ferramentas em um sistema automatizado de simulações envolvendo o *Matlab* e o *ATP*. Destaca-se também esta associação *Matlab/ATP* como uma interessante contribuição, pois permitem realizar simulações tão aderentes ao real

comportamento de um alimentador quanto forem precisas as informações na base de dados de circuitos de distribuição.

A justificativa dos autores em se empregar uma ferramenta inteligente no processo de detecção de faltas se dá ao fato de que métodos convencionais estimam a distância do provável local da falta através da impedância calculada a partir do transitório de curto-circuito, e inicia-se então um procedimento de busca pela região faltosa.

Tal linha de raciocínio esbarra no fato de que múltiplas regiões do alimentador podem apresentar características similares de impedância, consequentemente, tem-se um problema de multi-estimação da região faltosa.

Para exemplificar a dificuldade da estimação da impedância para a localização de faltas, tem-se na Figura 3.5 uma representação de um circuito de distribuição relativamente pequeno, onde os dados de uma falta permitiram estimar uma impedância. Como resultado destes cálculos, tem-se quatro regiões candidatas ao local da falta, como destacado pelas setas em amarelo.

Figura 3.5 – Métodos convencionais de busca da região faltosa.
Adaptado de Mora-Florez et al., 2008.

Mesmo reduzindo para quatro possíveis seções, é possível observar que se trata de um alimentador pequeno e com poucos ramais, sendo assim a estimação da impedância, uma metodologia ineficiente ao se pensar em alimentadores maiores.

Para então contornar as deficiências dos métodos convencionais de localização de faltas, os autores propuseram um sistema inteligente combinado com ferramentas de processamento de sinais, a fim de estimar a localização de faltas em linhas de distribuição. Utilizaram diversas variáveis e operações sobre elas, sendo as mesmas descritas a seguir:

- ΔV – Variação da magnitude da tensão: esta variável está associada ao valor eficaz em regime permanente da tensão antes e durante a ocorrência de uma falta;
- ΔI – Variação da corrente: esta variável está associada ao valor eficaz em regime permanente da corrente antes e durante a ocorrência de uma falta;

- ΔS – Variação da potência aparente: esta variável está associada às variações de carga antes e durante as situações de falta. Mudanças na potência aparente em condições faltosas ajudam a delinear quais tipos de cargas foram afetadas, devido a mudanças no fator de potência;
- X_f – Reatância da falta: normalmente utiliza-se a impedância de falta como sendo resistiva, mas a reatância da falta fornece informações mais precisas e que se relacionam melhor com o local da falta;
- F – Frequência do sinal de tensão transitório provocado pela falta: a frequência da tensão transitória durante a falta relaciona-se diretamente com os parâmetros capacitivos e indutivos do circuito remanescente, podendo ser associada à distância da falta.

Como resultado da escolha destas variáveis e da combinação de ferramentas, os autores obtiveram uma assertividade de 100% na identificação da fase envolvida na falta. Já a localização da região faltosa apresentou um erro de pouco menos de 4%.

Obviamente, destaca-se a combinação de ferramentas inteligentes e convencionais como fatores preponderantes aos bons resultados obtidos para a resolução do problema proposto. Entretanto, os autores exploraram apenas um tipo de falta e, apesar de mencionarem uma metodologia automatizada de simulações, fora utilizado o circuito equivalente de um alimentador de distribuição de 25 kV.

3.3.2 Localização de faltas de alta-impedância em alimentadores de distribuição com geração distribuída

A presença de geração distribuída é uma preocupação que se encontra presente na maioria dos trabalhos que empregam sistemas inteligentes na

identificação e localização de faltas em alimentadores de distribuição, pois os relés atuais produzem erros significativos de detecção de faltas de alta impedância em alimentadores com geração distribuída (Bretas *et al.*, 2006).

Bretas *et al.* (2006) utilizam Redes Neurais Artificiais e particularidades das faltas de alta impedância para localizar as regiões faltosas, investigando-se a magnitude e fase da corrente de falta até a 5ª harmônica.

Estudos apontam que é possível se modelar as faltas de alta-impedância como sendo duas fontes CC em série com diodos, conforme ilustrado na Figura 3.6. Durante o semiciclo positivo, a corrente flui através de V_P e, durante a fase negativa, por meio de V_N . As harmônicas geradas pelas faltas são funções da diferença $V_N - V_P$ e da relação X_L / R .

Figura 3.6 – Modelo de uma falta de alta-impedância.
Adaptado de Bretas *et al.*, 2006.

A metodologia proposta utiliza dados adquiridos em tempo real e processados de maneira que a falta possa ser detectada e localizada através da extração de características das tensões e correntes medidas na subestação.

O esquema é fundamentado no cálculo de componentes simétricas dos sinais harmônicos de corrente no ponto de conexão do relé. A metodologia combina a magnitude da 3ª harmônica, diferença angular entre a 3ª harmônica de corrente e a componente fundamental de tensão, computando-se a passagem por zero. Complementando as variáveis de entrada, tensões e correntes vindas do TP e TC da

subestação são processadas para se estimar 2ª, 3ª e 5ª harmônicas. As componentes de 1ª, 2ª, 3ª e 5ª harmônicas alimentam uma Rede Neural responsável por identificar e classificar faltas fase-fase e fase-terra. A saída da Rede Neural Artificial é a detecção e localização da falta.

O sistema de distribuição investigado encontra-se ilustrado na Figura 3.7.

*Figura 3.7 – Sistema de distribuição com geração distribuída.
Adaptado de Bretas et al., 2006.*

Na barra de número 6 do alimentador de estudo encontra-se conectado o gerador distribuído. É possível destacar que os procedimentos de simulações dos autores não conseguem reproduzir todos os detalhes do alimentador, sendo o mesmo representado através de circuito equivalente.

Na identificação de faltas de alta-impedância com geração distribuída, o método proposto apresentou 95% de acertos e o mesmo foi comparado com um convencional que apresentou 60% de acertos.

A localização da região faltosa apresentou um erro médio de 1% do comprimento total do alimentador, sendo a resposta da ferramenta a distância da falta até a subestação.

Os autores apresentam um estudo do impacto da geração distribuída para o processo de detecção de faltas, explorando diversos tipos de faltas e impedâncias e

apesar de bons resultados, a ferramenta proposta localiza faltas apenas no tronco principal do alimentador.

O esquema proposto é capaz de obter estimações precisas do local de faltas de baixa impedância (lineares) e de alta-impedância (não-lineares). Esta última classe representa um tópico importante para os sistemas de distribuição de energia porque podem dificultar a detecção e localização por parte dos dispositivos de proteção comumente utilizados atualmente.

Os resultados deste trabalho mostram que a metodologia proposta é digna de futuras pesquisas visando aplicações em tempo real.

3.3.3 Localização de faltas utilizando informações qualitativas da rede

A proposta de se localizar faltas, observada em Marusic e Gruhonjic-Ferhatbegovic (2006), consiste de uma metodologia bastante diferenciada em relação às demais encontradas em literatura. Isto porque foram explorados os aspectos qualitativos e não quantitativos da rede de distribuição. Sob esta ótica, é possível encontrar diversas informações envoltas de incertezas, sendo um ambiente propício para a aplicação de sistemas *fuzzy* no tratamento de tais informações.

Para compor todos os aspectos de desenvolvimento desta nova ferramenta de localização de faltas, os autores inspiraram-se no fato de que metodologias fundamentadas na estimação da impedância da falta para localização são ineficientes quando os alimentadores apresentam muitos ramais.

Assim, inicia-se a análise especialista para confecção dos sistemas *fuzzy* a partir da figura do operador, que coordena as equipes de inspeção. Nestes casos, o operador muitas vezes utiliza conhecimento especialista sobre o possível local da falta.

De uma maneira mais geral, é possível afirmar que os autores combinam a estimação da impedância com sistemas *fuzzy* para inferir o local da falta. Na Figura 3.8 tem-se um exemplo de como funciona o processo de localização de faltas proposto pelos autores.

Neste exemplo, considerando-se uma falta trifásica, o indicador de faltas em RCD3 encontra-se atuado, além da religadora ter desconectado o circuito. A impedância calculada da falta foi de $4,2\Omega$, sendo que os trechos de F1 a F5 são os possíveis candidatos.

Figura 3.8 – Circuito de exemplo para localização de faltas.
Adaptado de Marusic e Gruhonjic-Ferhatbegovic, 2006.

Após o processo de estimação da impedância, as variáveis linguísticas “Status das religadoras”, “Sinalização de indicadores de faltas”, “Qualidade da rede” e “Condições de terreno” são avaliadas pelo sistema *fuzzy*. Utilizam-se dados históricos de interrupções para ajustar as funções de pertinência referentes à

“Qualidade da rede”. Para compor a variável “Condições de terreno” são necessárias informações climáticas e também geográficas.

Após o processo de inferência, tem-se a indicação do trecho L4 como sendo o local mais provável da falta. Este método permite localizar trechos sob falta com grande assertividade, estimando também dentro de cada trecho a distância provável do defeito.

Apesar destas qualidades, faz-se necessário para a implementação desta estratégia um elevado automatismo do alimentador, sendo estes traduzidos na forma de Religadoras e Indicadores de Faltas com comunicação, além de mudanças nas funções de pertinência que compõem as variáveis do sistema *fuzzy* a cada mudança da rede.

3.3.4 Localização de faltas utilizando sistemas inteligentes híbridos

Para exemplificar todas as imprecisões, incertezas e não linearidades envolvidas com o processo de identificação e localização de faltas pode-se aqui destacar o trabalho contido em Mora *et al.* (2006). Isto porque os autores empregaram a ferramenta *ANFIS*, que é um poderosíssimo sistema inteligente híbrido, do tipo incorporado, e que possui Redes Neurais Artificiais e sistemas *fuzzy* em sua composição.

Além da ferramenta inteligente híbrida, os autores também empregaram ferramentas de processamento de sinais, tais como a Transformada *Wavelet*, explorando-se as informações contidas nos sinais de corrente de falta.

A combinação com Transformadas *Wavelet* permite realizar análises no tempo e na frequência simultaneamente, localizando dentro do sinal no tempo, determinados grupos de frequências. Tal ferramenta permite identificar mudanças abruptas em amplitude e frequência do sinal de corrente em condições de falta.

Para o processo de aprendizado do sistema *ANFIS*, dados reais de correntes de faltas são utilizados, sendo que a saída do sistema representa o trecho onde ocorreu a falta. As variáveis de entrada são processadas pela *Wavelet*, buscando-se determinar:

- Relação entre: corrente de falta e o tempo de operação da proteção;
- Variação entre: corrente na pré-falta e primeiro chaveamento;
- Variação entre: corrente na pré-falta e último chaveamento;
- Vetores de tempo de operação da proteção: disjuntores, religadoras e fusíveis.

O sistema investigado consiste de um alimentador que foi dividido em 5 trechos, sendo simuladas faltas com resistências variando entre $0,5\Omega$ e 40Ω . Os autores utilizaram 930 amostras para o aprendizado do sistema *ANFIS*. A taxa global de acertos verificada pelos autores foi de 99,14%.

Este trabalho apresenta importante contribuição ao constatar o grande relacionamento entre a variação da corrente após o último chaveamento e a pré-falta, culminando em eficiência de localização.

Como foi destacado, o alimentador utilizado para a investigação era relativamente pequeno, sendo tal fato determinante para a aplicação desta ferramenta.

3.4 Considerações parciais

Destacaram-se aqui neste capítulo algumas das ferramentas inteligentes como sendo aquelas mais referenciadas nos artigos científicos, pois o seu grande potencial de aplicação já vem sendo empregado com algum sucesso em diversos outros setores relacionados aos sistemas elétricos de potência.

Fica também evidente na pesquisa correlata que apenas a utilização de uma ferramenta inteligente não é capaz de suprir as necessidades de fenômenos faltosos nos sistemas de distribuição de energia elétrica brasileiro.

Apesar das soluções para identificar faltas de alta impedância apresentar um grande crescimento nos últimos anos, a maioria das metodologias encontradas em literatura foram apenas simuladas ou experimentadas com dados reais, não sendo implementadas na prática.

Ainda frente a este contexto, cabe-se também ressaltar que a representação dos alimentadores, por meio de circuitos equivalentes encontrada na maioria das abordagens pesquisadas, não é aplicável em alimentadores de grande porte.

4. Aspectos da Metodologia Desenvolvida

4.1 Introdução

A combinação de ferramentas de processamento de sinais com ferramentas pertencentes à classe de Sistemas Inteligentes tem obtido sucesso no processo de detecção de faltas.

Um aspecto da metodologia desenvolvida é a utilização de estratégias híbridas, pois a combinação de uma ou mais ferramentas inteligentes integradas a outras com reconhecidas características de tratamento de sinais já vêm proporcionando resultados promissores aos processos envolvidos com a identificação, classificação e localização das faltas nos sistemas de distribuição.

A metodologia proposta utiliza de ferramentas inteligentes e numéricas, que são integradas e sintonizadas entre si por um sistema automatizado, visando reunir as potencialidades individuais de cada uma delas em um único sistema. Assim, a tecnologia proposta possui um maior grau de robustez e eficiência que a diferencia das demais.

4.2 Aspectos do sistema automatizado para identificação e localização de faltas

O desenvolvimento de todo o sistema automatizado pode ser dividido em diversos objetivos. Assim, por meio da Figura 4.1, tem-se a ilustração, de forma esquemática, da modularização do sistema de identificação e localização de faltas proposto.

Conforme se pode observar o sistema é composto pelo módulo de aquisição de dados, módulo de pré-processamento, módulo de identificação de transitórios, sistema de identificação das fases participantes da falta, sistema classificador de faltas e pelo sistema localizador de faltas. Resumidamente, esse sistema opera fazendo-se uso dos dados aqusitados do sistema de distribuição. Em princípio, esses dados são constituídos pelas três tensões de fase e pelas três correntes de linha. Considerando-se que o emprego de transformadores de corrente (TC) não é comum na medição da corrente de terra, essa grandeza é calculada tendo como resultado a corrente residual dos transformadores de corrente de fase.

O módulo de aquisição de dados tem por funcionalidade a adequação dos níveis de tensão e de corrente do sistema de distribuição de maneira que os mesmos possam ser digitalizados e aqusitados, mais detalhes do modulo de aquisição de dados estão caracterizados no Apêndice E.. Esses dados digitalizados são, por sua vez, processados e seus principais parâmetros são determinados por meio do módulo de pré-processamento.

Figura 4.1 – Representação esquemática do sistema de identificação e localização de faltas.

Fazendo-se uso desses parâmetros, o módulo de identificação de transitórios detecta quando um distúrbio se inicia e, em virtude de sua identificação, classifica o mesmo como sendo advindo de alterações de carga no sistema de distribuição ou proveniente de uma condição de falta. A identificação de uma condição de falta, por sua vez, desencadeia a operação do sistema de identificação

das fases participantes da falta. Por fim, tendo como dados as fases que participaram da falta, o sistema classificador de faltas informa qual o tipo de falta que tem sido identificado, ao passo que o sistema localizador de falta indica o local onde a mesma ocorreu.

A principal funcionalidade do módulo de pré-processamento é de agrupar ou compactar os dados de formas de onda a fim de que a quantidade excessiva de dados, advindos desses sinais, possa a ser representado por um menor número de parâmetros.

O módulo de identificação de transitórios permite identificar a existência de transitórios de corrente e tensão em sistemas de distribuição, independentemente de sua origem. Esse resultado dará seguimento ao processo de identificação das fases participantes e de sua respectiva classificação.

De forma mais específica, a representação esquemática mostrada na Figura 4.1 pode ser complementada pelo diagrama de blocos apresentado na Figura 4.2, em que se observam as etapas destinadas à identificação de faltas, discriminação de fases participantes e estimação da distância e da resistência de falta.

Por intermédio desse diagrama esquemático é possível observar que, diante da identificação da ocorrência de uma falta, tem-se a consequente determinação do tipo de falta identificada. A identificação do tipo de falta recebe grande importância, uma vez que essa característica determinará a forma pela qual os dados do distúrbio serão processados com o objetivo de se determinar as fases participantes da falta, assim como de se proceder com a estimação da distância de ocorrência e da resistência de falta. O rótulo FFF ou 3F refere-se às faltas trifásicas, DLF às faltas fase-fase, FFT às faltas fase-fase- terra, FFP às faltas fase-terra paralela e FFS às faltas fase-terra série.

Figura 4.2 – Diagrama esquemático do sistema identificador de faltas.

A Figura 4.3 apresenta a arquitetura do sistema para determinação do tipo de falta identificada. A operação deste sistema atribui, para cada tipo de falta, um índice de probabilidade o qual, se próximo à unidade, indica uma forte tendência do distúrbio estar associado a esse tipo de falta.

Figura 4.3 – Diagrama esquemático para o sistema de identificação da tipologia da falta.
Adaptado de Flauzino, 2007.

Se, por outro lado, esse índice estiver próximo de ser nulo, o oposto se aplica. Assim, o módulo de classificação de falta informa o tipo de falta tendo como base o maior índice de probabilidade calculado.

Uma vez identificada o tipo de falta, tem-se a necessidade de se identificar as fases participantes da falta. Para as faltas do tipo DLF e FFT, o sistema da Figura 4.4 é empregado.

Figura 4.4 – Diagrama esquemático para discriminação das fases participantes para faltas do tipo DLF e FFT. Adaptado de Flauzino, 2007.

Já para as faltas do tipo FFP e FFS, o diagrama representado na Figura 3.8 passa a ser então válido.

Figura 4.5 – Diagrama esquemático para discriminação das fases participantes para faltas do tipo FFP e FFS. Adaptado de Flauzino, 2007.

Tanto a identificação do tipo de falta como o processo de discriminação das fases participantes da falta fizeram uso de dados advindos da técnica de decomposição em componentes ortogonais, conforme propostos em Flauzino e Silva

(2007) e Flauzino (2007). O número de componentes empregadas em cada uma dessas tarefas fora igual a cinco. Além disso, recebendo como entradas tais componentes, tem-se redes neurais artificiais do tipo *perceptron* multicamadas, as quais foram treinadas por meio de conjuntos de amostras compostos, para cada tipo de falta, por um total de 18 mil situações de faltas simuladas computacionalmente.

4.3 Sistema de aquisição de dados elétricos

Com a finalidade de refinar os procedimentos de localização de faltas, os processos envolvidos foram automatizados na forma de funções independentes. Esta linha de trabalho permite um maior controle do fluxo de código à medida que também deixa modular os processos relacionados com as etapas de identificação e localização de faltas, proporcionando ao sistema uma arquitetura robusta com redundância de informações.

Assim, nas sessões que se seguem serão detalhados os desenvolvimentos que foram realizados neste processo de automatização da detecção de faltas.

4.3.1 Automatização das etapas de identificação e localização de faltas

O arquivo principal do Sistema de Aquisição de Dados Elétricos (SADE) funciona de maneira compartimentar, acionando-se outras funções. A estrutura deste arquivo funciona de forma contínua dentro de um laço, que se inicia com a aquisição de novas amostras de sinais elétricos, tal como descrito a seguir:

1. Aquisição de sinais de corrente e tensão mediante uma solicitação de *trip*, previamente ajustada para cada alimentador;
2. Identificação dos segmentos de faltas;
3. Cálculo dos fasores de tensão e corrente, e componentes simétricas;
4. Determinação da fase participante da falta;

5. Análise de reatância e resistência de falta para cada segmento;
6. Criação do arquivo de saída.

Cada um dos itens de 2 a 6 é realizado por uma função específica, sendo que as maiores contribuições e avanços realizados foram nos itens de 2 a 5.

Identificação dos segmentos de falta:

Após a obtenção do registro de oscilografia, deve-se definir como os dados serão utilizados, ou seja, se todo o registro será processado de uma vez ou se a análise será feita em partes, mediante a segmentação do sinal. Esta escolha vai depender do tipo de distúrbio que se deseja analisar. Neste aspecto, de uma maneira simplificada, os distúrbios podem ser enquadrados em duas classes:

- Variações: São distúrbios em regime permanente, ou quase regime permanente, como por exemplo, a existência de conteúdo harmônico indesejável na rede elétrica.
- Eventos: São distúrbios bruscos, como interrupções, afundamentos de tensão, faltas, entre outros.

Apesar de serem definidos para estudos de qualidade de energia, estes termos também podem ser utilizados em outras aplicações. É na etapa de segmentação que os eventos (ou variações) são detectados e, caso necessário, o registro da oscilografia é dividido em partes conforme a necessidade da metodologia de análise utilizada.

Na Figura 4.6 tem-se um exemplo de registro, onde é armazenado um fasor (módulo e fase) para cada ciclo da frequência fundamental do sistema. O segmento de falta é representado pela região hachurada.

Figura 4.6 – Processo de segmentação da oscilografia.

Na ocorrência de um distúrbio real em redes de distribuição, diferente de ambientes simulados, as faltas transitórias e a dinâmica não linear dos sistemas de distribuição dificultam o ajuste de *trip* para as oscilografias de falta. Isso requisitou criar uma função no sistema de aquisição de dados para segmentar corretamente os dados de uma falta oscilografada nos diferentes alimentadores em estudo.

A correta segmentação das faltas é muito importante, pois determinará os dados que serão utilizados nos módulos de identificação e localização das faltas.

A função desenvolvida, denominada *FindFaultsSegments*, tem por objetivo determinar os segmentos de falta de uma oscilografia. Os segmentos de falta são definidos como aqueles que possuem uma corrente superior ao limiar *inLimiar*, com uma duração mínima de *minCycles*. Segmentos com uma distância igual ou inferior a *minCycles* são agrupados em um único segmento. Detalhes desta função podem ser conferidos no Apêndice A.

Determinação da fase participante da falta:

Feita a segmentação, a próxima etapa é a extração de características em cada segmento e determinação das fases participantes num determinado evento. A escolha das características vai depender do problema abordado e da metodologia de solução. As características mais utilizadas são as seguintes:

- Valores médios ou eficazes das grandezas monitoradas (tensões e correntes) em cada segmento.
- Valores médios de grandezas calculadas, tais como potência elétrica ou componentes simétricas.
- Conteúdo harmônico dos dados, obtido por meio da transformada de Fourier.
- Coeficientes de detalhe obtidos com a análise multiresolução da transformada *wavelet*.

A extração de características tem a função de reduzir a quantidade de dados a serem utilizadas para avaliar, automaticamente ou não, uma ocorrência registrada em uma oscilografia.

Esta função, denominada *FindFaultedPhase*, tem por objetivo determinar a fase participante da falta. O critério de definição é baseado na diferença angular entre os fasores das componentes de sequência zero e negativa. Detalhes desta função podem ser conferidos em Flauzino e Silva (2007), Flauzino (2007) e no Apêndice B.

Análise de reatância e resistência de falta:

As atividades desenvolvidas nessa análise foram focadas na elaboração de uma nova técnica destinada aos propósitos de localização de faltas em sistemas de distribuição, a qual se apresenta com mais detalhes no decorrer das próximas seções. Desta forma, essa nova metodologia foi adicionada às técnicas inteligentes anteriormente desenvolvidas.

Esta função, denominada *FaultLocation*, tem por objetivo estimar o local provável de ocorrência das faltas, considerando-se aqui os segmentos de falta

identificados. Detalhes desta função podem ser conferidos nas Seções seguintes e no Apêndice C.

4.4 Sistema para modelagem de alimentadores para fins de identificação e localização de faltas

Para os processos de identificação e localização de faltas é preciso que a modelagem dos alimentadores seja a mais fiel possível.

Visando tal objetivo, foram então empregadas metodologias de leitura e extração de informações dos alimentadores pilotos a partir das bases de dados das redes elétricas disponíveis na concessionária, as quais são capazes de realizar a modelagem completa do alimentador. Enfatiza-se que a fidelidade destas informações estão ainda diretamente relacionadas àquelas cadastradas nos seus mínimos detalhes.

Para ilustrar tal processo, na Figura 4.7 é possível visualizar a representação completa de um alimentador real, objeto de estudo.

Figura 4.7 – Representação do alimentador JCE1312.

O sistema computacional desenvolvido para fins de modelagem de alimentadores opera da seguinte forma:

- Leitura do arquivo descritivo de cada ETD;
- Interpretação dos dados e seleção do alimentador;
- Identificação da distribuição das cargas no alimentador;
- Determinação do estado das chaves manobráveis;
- Cálculo do tronco principal.

A leitura das informações nos arquivos bases de simulação tem por objetivos identificar os circuitos presentes na ETD correspondente, e também identificar os

componentes descritos, tais como trechos primários, estações transformadores, bancos de capacitores, reguladores de tensão, chaves, etc. Como resultado, têm-se então todos os elementos constituintes do circuito de interesse para a modelagem.

Assim, em resumo, ter-se-á uma representação sumarizada do alimentador de maneira que em cada derivação se tenha a impedância equivalente do sistema elétrico à frente.

Na Figura 4.8 tem-se uma representação desse sistema elétrico com suas respectivas derivações.

Figura 4.8 – Representação do alimentador e suas derivações.

O cálculo da impedância equivalente leva em consideração as seguintes informações do sistema elétrico:

- Clientes;
- Iluminação pública;
- Tipo de estrutura e bitola dos condutores elétricos do sistema de média tensão;
- Condições de pré-falta oscilografadas pelos sistemas de aquisição de dados.

O trecho de tronco principal entre duas barras subsequentes é representado pelo seu quadripolo equivalente.

Uma vez que o sistema de distribuição passa a ser representado pelo seu equivalente elétrico torna-se então possível a estimação do local de ocorrência da falta por meio de técnicas de cálculo de impedância similares às equações das impedâncias aparentes (Roberts *et al.*, 1993) listadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Equações da Impedância Aparente $Z = V/I$

“Loop” de Falta	Equações
AN	$V_A/[I_A + k_0.I_R]$
BN	$V_B/[I_B + k_0.I_R]$
CN	$V_C/[I_C + k_0.I_R]$
AB	$[V_A - V_B]/[I_A - I_B]$
BC	$[V_B - V_C]/[I_B - I_C]$
CA	$[V_C - V_A]/[I_C - I_A]$

Nota:

$$I_R = 3I_0 = I_A + I_B + I_C;$$

$$k_0 = (Z_{0L} - Z_{1L})/(3.Z_{1L});$$

Z_{0L} = impedância de sequencia zero da linha;

Z_{1L} = impedância de sequencia positiva da linha.

4.5 Aspectos de método inovador para propósitos de localização de faltas

Devido à variedade de tipos de falta possíveis num circuito trifásico, os relés de distância, que visam encontrar o provável local da ocorrência de uma falta, devem estar disponíveis para responder às tensões e correntes associadas a seis diferentes circuitos (“loops”) de falta (AB, BC, CA, AN, BN e CN) (Roberts *et al.*, 1993).

Um enfoque para implementar relés de distância é calcular a impedância aparente $Z = V/I$, e então verificar se essa impedância localiza-se no interior de alguma forma geométrica, como um círculo ou um quadrilátero.

Embora relés tenham sido construídos a partir deste critério, seu desempenho varia sob várias condições práticas de fluxo de potência e resistência de falta.

O método $Z = V/I$ é atraente naquilo em que requer apenas um cálculo de impedância por “loop” de falta, conforme equações listadas na Tabela 4.1.

Analizando o desempenho do método para uma falta fase-neutro para um sistema equivalente ao apresentado na Figura 4.9, observa-se que para o sistema radial, $\angle I_F = \angle I$ e o método $Z = V/I$ mede acuradamente a reatância até a falta.

Figura 4.9 – Diagrama unifilar do sistema.

onde:

V = tensão da fase A medida na Barra S;

m = distância em por-unidade da falta até a barra S;

Z_{1L} = impedância de sequência positiva da linha;

I_A = corrente da fase A medida na Barra S;

$k_0 = (Z_{0L} - Z_{1L})/(3 \cdot Z_{1L})$, onde Z_{0L} = impedância de sequência zero da linha;

I_R = corrente residual medida na Barra S;

R_F = resistência de falta;

I_F = corrente total que flui em R_F ;

A Figura 4.10 mostra as componentes resistiva e reativa da impedância medida por um relé para uma falta AN com $m = 0,85$ e com $R_F = 4,6 \, \Omega$ secundários (ou $50 \, \Omega$ primários, dados RTP/RTC = 3500/320). Como $R_F \cdot (I_F/I)$ é um número real, o $\text{Im}(V/I) = m \cdot X_{1L}$, qualquer que seja o valor de R_F .

Figura 4.10 – Método da impedância aparente AN mede corretamente a reatância até a falta para uma linha radial.

Se analisarmos novamente o circuito da Figura 4.9, considerando agora a chave junto à Barra R fechada, e assumido fluxo de potência da Barra S para a Barra R com $\delta = 30^\circ$, pode-se então observar os efeitos do fluxo de potência e resistência de falta na medição da impedância aparente.

A Figura 4.11(a) mostra que o relé da Barra S sobrealcança em função de $\text{Im}(V/I)$ medir uma reatância menor que a reatância da linha até a falta. Isto é porque I_F e I não estão em fase, Figura 4.11(b), e R_F aparece como uma impedância complexa.

Figura 4.11 – Sobrealcance da impedância aparente AN com R_F e fluxo de potência exportado ($\delta = 30^\circ$)

Este sobrealcance torna-se mais pronunciado conforme R_F e δ aumentam. A Figura 4.12 ilustra sub e sobrealcances do critério $Z = V/I$ para diferentes R_F e condições de fluxo de potência. O alcance do relé está ajustado em $r \cdot Z_{1L}$, onde $r = 0,85$. O critério $Z = V/I$ subalcança para potência importada (I_F adiantada de I) e sobrealcança para potência exportada (I_F atrasada de I).

Figura 4.12 – O Desempenho do critério de impedância aparente depende de R_f e de δ .

Há meios melhores para se estimar a correta reatância até a falta, assim como a resistência de falta, sendo que estes métodos dependem da seleção adequada das grandezas de polarização (Roberts *et al.*, 1993).

A Figura 4.11 mostra que a corrente da fase defeituosa não está sempre em fase com a corrente total de falta, I_f . Portanto, a corrente de fase é uma opção fraca para ser o sinal de referência ou polarização. A corrente de sequencia negativa ou a corrente residual são opções melhores, pois não são afetadas por δ ou pela resistência de falta.

Métodos que puramente analisam a impedância acabam por se deparar com múltiplas seções faltosas para um mesmo universo de busca de valores. A metodologia empregada nesse trabalho para cálculo das impedâncias considera as implicações colocadas por Roberts *et al.* (1993).

Os métodos para localização de faltas em sistemas de energia elétrica podem ser delineados de diferentes formas, sendo que aquelas que se baseiam em análises de circuitos elétricos constituem uma dessas. Dessa forma, nessa seção será delineada a formulação proposta por Takagi *et al.* (1981) tanto para sistemas monofásicos como sua generalização para sistemas trifásicos.

Para tanto, será considerado o sistema elétrico apresentado por meio da Figura 4.13, onde a linha de transmissão possui uma impedância série z e uma condutância *shunt* y .

Figura 4.13 – Sistema elétrico no instante pré-falta.

No diagrama esquemático destacado por meio da Figura 4.13, tem-se que V'_S representa o fasor de tensão na barra S antes da ocorrência da falta, bem como V'_R denota o fasor de tensão na barra R nesse instante. A corrente medida na barra S é representada pelo seu fasor I'_S , enquanto que I'_R representa o fasor de corrente medido na barra R.

Com base no teorema da superposição de respostas para sistemas lineares, diante da ocorrência de uma falta, tal como a ilustrada por meio da Figura 4.14, o circuito pode ser representado pela condição puramente faltosa, resultando, por sua vez, no circuito ilustrado por meio da Figura 4.15.

No circuito ilustrado por meio da Figura 4.14, tem-se que I_F representa o fasor da corrente de falta e R_F a respectiva resistência para essa falta. É notável que em função dessa ocorrência os fasores de tensão e de corrente observados nas barras R e S também se alteraram, sendo que, durante a condição de falta, nomear-se-á os fasores de tensão por V_R e por V_S , enquanto que os fasores de corrente serão denotados por I_R e I_S , respectivamente.

Assim, sendo V_F o fasor de tensão no ponto de ocorrência da falta, a qual ocorrera a uma distância x da barra S , e I_F a corrente de falta que circula por meio da resistência de falta R_F , tem-se: (Figura 4.15)

$$V_F = R_F I_F = -R_F (I_{FS}'' + I_{FR}'') \quad (4.1)$$

onde I_{FS}'' é a parcela da corrente de falta que circula pela linha em direção à barra S , enquanto I_{FR}'' circula em direção à barra R .

Figura 4.14 – Sistema elétrico no instante de ocorrência de uma falta.

Com base nesses dois fasores de corrente é possível definir a variável $K(x)$, a qual representa a razão entre os mesmos, ou seja:

$$K(x) = \frac{I_{FR}''}{I_{FS}''} \quad (4.2)$$

Dessa maneira, a expressão (4.1) pode ser escrita da seguinte forma:

$$V_F = R_F I_F = -R_F I_{FS}'' (1 + K(x)) \quad (4.3)$$

Como os valores de V_F e I_{FS}'' não são conhecidos, torna-se então conveniente representar a linha de transmissão por meio de um quadripolo e, assim, por meio da informação da barra S, determiná-los. Dessa forma, a seguinte representação é possível:

$$V_F = A(x)V_S - B(x)I_S'' \quad (4.4)$$

$$I_{FS}'' = C(x)V_S'' - D(x)I_S'' \quad (4.5)$$

onde os parâmetros do quadripolo da linha no trecho S–F podem ser obtidos por meio das seguintes equações:

$$A(x) = D(x) = \cosh(\gamma x) \quad (4.6)$$

$$B(x) = Z_c \sinh(\gamma x) \quad (4.7)$$

$$C(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) \quad (4.8)$$

onde $\gamma = \sqrt{zy}$ é denominada por constante de propagação da linha e $Z_c = \sqrt{z/y}$ é sua respectiva impedância característica. Os fasores observados quando da condição faltosa podem ser obtidos diretamente por meio de medidas realizadas na barra S durante os instantes de pré-falta e de pós-falta.

Figura 4.15 – Sistema elétrico equivalente no instante de ocorrência de uma falta.

Dessa maneira, as seguintes equivalências podem ser estabelecidas:

$$V_S'' = V_S - V_S' \quad (4.9)$$

$$I_S'' = I_S - I_S' \quad (4.10)$$

Como consequência direta do exposto em (4.4) e (4.5), tem-se a possibilidade de desenvolver a expressão (4.11) da seguinte forma:

$$V_F = -R_F I_{FS}'' (1 + K(x))$$

$$A(x)V_S - B(x)I_S = -R_F (C(x)V_S'' - D(x)I_S'') (1 + K(x))$$

$$R_F (1 + K(x)) = -\frac{A(x)V_S - B(x)I_S}{C(x)V_S'' - D(x)I_S''} \quad (4.11)$$

Observando-se a equação (4.11) é possível a identificação que a distância x de ocorrência da falta, a resistência de falta R_F e o valor de $K(x)$ constituem suas incógnitas. Assim, a fim de se determinar a distância x torna-se necessário algumas aproximações que sejam hábeis na desconsideração de R_F e o valor de $K(x)$. A primeira dessas aproximações impõe que R_F seja puramente resistiva, não possuindo, portanto, parcela imaginária. A segunda aproximação, pontuada por Takagi *et al.* (1981), estabelece que a relação $K(x)$ também é um valor real. Essa consideração é válida supondo-se uma linha de transmissão sem perdas, bem como tendo impedâncias equivalentes para as fontes como sendo puramente indutivas. Portanto, valendo-se de ambas considerações é possível inferir que $R_F(1 + K(x))$ possui apenas componentes reais, ou seja:

$$\text{Im} \left(\frac{A(x)V_S - B(x)I_S}{C(x)V_S'' - D(x)I_S''} \right) = 0 \quad (4.12)$$

A expressão destacada em (4.12) possui um comportamento linear em função das funções $A(x)$, $B(x)$, $C(x)$ e $D(x)$, sendo imperativo para a obtenção de x o

emprego de técnicas para solução de equações não-lineares. No entanto, é possível constatar que a referida distância entre a barra S e o ponto de ocorrência da falta é estimada apenas com medidas locais na referida barra. Além disso, a estimativa de x não dependerá da resistência de falta R_F .

O método apresentado pode ser estendido para a localização de faltas em sistemas trifásicos, bem como ser particularizado para faltas fase-terra. Para que o desenvolvimento seja possível, torna-se conveniente a representação do sistema trifásico por meio de suas redes de sequência, assim como se ilustra por meio da Figura 4.16.

Assim, empregando-se as equações de linha e efetuando-se os desenvolvimentos e considerações necessárias, a Expressão (4.13) é alcançada, a qual mediante sua solução numérica resulta na distância, em relação à barra S , da ocorrência da falta.

$$\text{Im} \left(\frac{V_F^{(0)} + V_F^{(1)} + V_F^{(2)}}{C(x)^{(1)} V_S^{*(1)} - D(x)^{(1)} I_S^{*(1)}} \right) = 0 \quad (4.13)$$

onde:

$$\begin{cases} V_F^{(0)} = A(x)^{(0)} V_S^{(0)} - B(x)^{(0)} I_S^{(0)} \\ V_F^{(1)} = A(x)^{(1)} V_S^{(1)} - B(x)^{(1)} I_S^{(1)} \\ V_F^{(2)} = A(x)^{(2)} V_S^{(2)} - B(x)^{(2)} I_S^{(2)} \end{cases} \quad (4.14)$$

O método apresentado em Takagi *et al.* (1981) fora posteriormente particularizado para linhas com comprimento inferior a 100 km. As considerações necessárias à referida particularização são relatados em Takagi *et al.* (1982) e, tal como feito em Takagi *et al.* (1981), o método se fundamenta sobre o conjunto de equações que segue.

Figura 4.16 – Rede de sequencia para uma falta fase-terra.

$$V_F = R_F I_F = -R_F (I_{FS}'' + I_{FR}'') \quad (4.15)$$

$$V_F = V_S \cosh(\gamma x) - I_S Z_c \sinh(\gamma x) \quad (4.16)$$

$$I_{FS}'' = \frac{V_S}{Z_c} \sinh(\gamma x) - I_S \cosh(\gamma x) \quad (4.17)$$

Dessa forma, a corrente de falta I_F fora expressa por meio do seguinte relacionamento:

$$I_F = I_{FS}^* \zeta \quad (4.18)$$

onde $\zeta = \zeta e^{j\theta}$ e $\theta = \arg(I_F / I_{FS}^*)$ representa a diferença angular entre as correntes de falta provenientes da barra S e da barra R. Segundo Takagi *et al.* (1982), o valor de θ esperado é próximo a zero. Dessa forma, substituindo (4.18), bem como (4.16), (4.17) e (4.18) na referida expressão e dividindo ambos os termos por $\cosh(\gamma x)$, tem-se:

$$V_S - I_S Z_c \tanh(\gamma x) - R_F \left(\frac{V_S^*}{Z_c} \tanh(\gamma x) - I_S^* \right) \zeta e^{j\theta} = 0 \quad (4.19)$$

Percebe-se que ζ e R_F são números reais. Então, isolando-se o termo ζR_F e tomando apenas a parte imaginária de ambos os lados da igualdade se pode eliminar estas duas incógnitas da formulação, chegando-se à seguinte expressão:

$$\text{Im} \left[\left(V_S - I_S Z_c \tanh(\gamma x) \right) \left(\frac{V_S^*}{Z_c} \tanh(\gamma x) - I_S^* \right)^* e^{j\theta} \right] = 0 \quad (4.20)$$

Na equação acima, θ e x são valores desconhecidos. Então, sabendo-se do valor de θ , a distância da falta x pode ser determinada. Conforme mencionado anteriormente, o ângulo θ representa a diferença angular entre as correntes de falta do terminal local e remoto. Segundo Takagi *et al.* (1982), o valor do ângulo θ é aproximadamente nulo. Então, substituindo θ por zero e usando as seguintes aproximações, que segundo Takagi *et al.* (1982) são válidas para linhas curtas,

$$\tanh(\gamma x) \cong \gamma x \quad (4.21)$$

$$\frac{V_S^*}{Z_c} \tanh(\gamma x) \ll I_S^* \quad (4.22)$$

chega-se a expressão seguinte que pode ser utilizada para determinar a distância da falta:

$$x = \frac{\text{Im}(V_S I_S^{**})}{\text{Im}(Z I_S I_S^{**})} \quad (4.23)$$

onde $Z = \gamma Z_c$ é a impedância da linha por unidade de comprimento. Por meio das aproximações sugeridas em Takagi *et al.* (1982), a localização de faltas para sistemas trifásicos pode ser particularizada para as faltas fase-terra da seguinte maneira:

$$x = \frac{\text{Im}\left(I_S^{**} \left(V_S^{(0)} + V_S^{(1)} + V_S^{(2)}\right)\right)}{\text{Im}\left(I_S^{**} \left(Z^{(0)} I_S^{(0)} + Z^{(1)} I_S^{(1)} + Z^{(2)} I_S^{(2)}\right)\right)} \quad (4.24)$$

De fato, os métodos de localização de faltas apresentados nessa seção foram desenvolvidos especificamente para sistemas de transmissão de energia. As linhas de transmissão são geralmente consideradas homogêneas ao longo de sua extensão, ou seja, é constituída de um único condutor sem cargas ou derivações em pontos intermediários. Por outro lado, nos sistemas de distribuição de energia, um mesmo alimentador pode ser constituído de segmentos com diferentes condutores, resultando em trechos com valores de impedância por unidade de comprimento distintos. Além disso, diversas cargas e ramificações podem estar conectadas ao longo do alimentador. Estas características fazem com que os métodos descritos anteriormente não possam ser utilizados diretamente nestes sistemas. Para se obter uma estimativa precisa da distância da falta em sistemas de distribuição de energia elétrica se faz necessário considerar as diversas cargas conectadas ao longo do alimentador, bem como eventuais ramificações laterais, ou seja, a modelagem do

alimentador deve contemplar o máximo de informações possíveis a fim de garantir resultados próximos aos observados em sistemas de distribuição reais.

Complementando a citação dos adverbos nessa linha, no trabalho de Lee *et al.* (2004) foi apresentado um algoritmo iterativo para localização de faltas em sistemas de distribuição de energia que leva em conta as características de tais sistemas. O algoritmo executa o cálculo da distância de falta para cada seção do alimentador, sendo as tensões e correntes em cada nó do circuito estimadas via análise de circuitos. Assim, pode-se pensar no algoritmo proposto como a aplicação do Takagi simplificado para cada trecho da linha de distribuição. Além do referido trabalho, Girgis *et al.* (1993), Zhu *et al.* (1997) e Das *et al.* (2000) já haviam publicado anteriormente metodologias semelhantes, também baseadas nas estimativas dos valores de corrente e tensão em cada nó do alimentador. O algoritmo de Lee *et al.* (2004) será detalhado a seguir, uma vez que representa uma das abordagens, baseadas em análises de circuitos elétricos, mais recentes reportadas na literatura correlata.

Para o desenvolvimento do método proposto por Lee *et al.* (2004) faz-se necessário, inicialmente, a consideração de uma falta fase-terra envolvendo a fase a de um alimentador de distribuição de energia conforme a Figura 4.17.

Assim, a tensão na barra S, representativa da barra da subestação de distribuição, pode ser calculada da seguinte maneira:

$$V_{Sa} = x(Z_{La}I_{Sa}) + I_F R_F \quad (4.25)$$

A equação (4.25) pode então ser desenvolvida conforme se segue:

$$\begin{aligned} I_F R_F &= V_{Sa} - xZ_{La}I_{Sa} \\ I_F^* I_F R_F &= I_F^* (V_{Sa} - xZ_{La}I_{Sa}) \end{aligned} \quad (4.26)$$

Figura 4.17 – Modelo simplificado do alimentador de distribuição.

Como $I_F^* I_F R_F$ resulta em um valor real, tem-se que a parcela imaginária de $I_F^* (V_{Sa} - x Z_{La} I_{Sa})$ será nula, tornando então possível a determinação da distância x , ou seja:

$$x = \frac{\text{Im}(V_{Sa} I_F^*)}{\text{Im}(Z_{La} I_{Sa} I_F^*)} \quad (4.27)$$

onde:

$$I_F = I_{Sa} - I_{La} \quad (4.28)$$

Em função da existência de cargas intermediárias ao longo de um alimentador de distribuição e da elevada resistência da linha, as quedas de tensão provocadas pela falta podem se tornar significativas e com isso modificar a corrente consumida por cada carga do circuito, se estas forem modeladas como impedância ou potência constante. Assim, é equivocada a hipótese de que a corrente de carga durante a falta (I_{La}) pode ser assumida como sendo seu valor pré-falta (I_{Sa}). Pode-se observar que se esta aproximação for feita, a Equação (4.27) torna-se idêntica à Equação (4.23) determinada pelo método de Takagi para linha curtas.

Logo, I_{La} , é também uma incógnita na formulação. Lee *et al.* (2004) propuseram em seu trabalho uma técnica iterativa para estimar seu valor. Esse

processo iterativo compõe o algoritmo de localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica, o qual é composto das seguintes etapas:

ETAPA 1: Assume-se I_{La} como sendo o valor da corrente de carga;

ETAPA 2: Calcula-se a corrente de falta I_F utilizando (4.28);

ETAPA 3: Determina-se a primeira estimativa da localização da falta utilizando (4.27);

ETAPA 4: Calcula-se a tensão no ponto da falta utilizando (4.29);

$$\begin{pmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{pmatrix} - x \begin{pmatrix} Z_{La} I_{Sa} \\ Z_{Lb} I_{Sb} \\ Z_{Lc} I_{Sc} \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

ETAPA 5: Utiliza-se a tensão de falta para obter um valor de I_{La} atualizado;

ETAPA 6: Volta-se à Etapa 2 com um novo valor de I_F e o processo é repetido até que x convirja.

Verifica-se, contudo, que conforme apresentado para a Etapa 4 do algoritmo proposto por Lee *et al.* (2004), faz-se necessário a estimação do valor da corrente de carga I_{La} durante a falta a partir do valor atualizado da tensão no ponto da falta. Se a carga é modelada como impedância constante e seu valor é conhecido, pode-se calcular I_{La} da seguinte forma:

$$I_{La} = Y_{La} V_{Fa} \quad (4.30)$$

Na equação anterior, Y_{La} representa a matriz admitância da seção da linha após o ponto da falta e da carga, sendo que seu valor pode ser calculado da seguinte maneira:

$$Y_{La} = ((1-x)Z_{La} + Z_R)^{-1} \quad (4.31)$$

Se a impedância da carga não for conhecida, pode-se estimar I_{La} a partir da equação (4.32).

$$I_{La} = \frac{I'_{La}}{V'_{Fa}} V_{Fa} \quad (4.32)$$

onde V'_{Fa} é a tensão pré-falta da fase a no ponto da falta, dada por meio de (4.33); I'_{La} é a corrente de carga pré-falta da fase a , tal como V'_{Sa} é a tensão pré-falta da fase a medida na barra S . Nota-se que na equação (4.32), Y_{La} foi substituído por uma estimativa do seu valor com base em valores pré-falta medidos na subestação.

$$V'_{Fa} = V'_{Sa} - xZ_{La} I'_{La} \quad (4.33)$$

Se a distância de falta obtida x é maior do que a extensão da seção considerada significa que a falta não ocorreu nesta, mas sim em alguma das seções seguintes. Então, um novo processo de localização da falta deve ser executado para a próxima seção, utilizando os valores de corrente e tensão no seu nó inicial. No entanto, como as medições de corrente e tensão são realizadas apenas na subestação, faz-se necessário uma maneira de estimar estes valores em cada nó do alimentador. Assim, considerando o modelo completo de um alimentador radial exposto na Figura 4.18, a tensão no nó $k + 1$ pode ser obtida por meio da Equação (4.34).

$$V_{k+1} = V_k - Z_k I_k \quad (4.34)$$

onde V_k é a tensão na barra k , Z_k é a impedância da k -ésima seção de linha e I_k é o valor da corrente na k -ésima seção. Considerando as cargas como impedância constante, a k -ésima corrente de carga pode ser calculada por meio de (4.35).

$$I_{Lk} = Y_{Lk} V_k \quad (4.35)$$

onde I_{Lk} é a corrente consumida pela carga conectada na barra k e Y_{Lk} é a admitância desta carga. Finalmente, pode-se calcular a corrente da k -ésima seção do alimentador utilizando a equação (4.36).

$$I_k = I_{k-1} - I_{Lk} \quad (4.36)$$

Assim, o algoritmo de localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica proposto executa um processo de localização de faltas para cada seção do alimentador, utilizando as estimativas de V_k e de I_k descritas. Uma vez que x converge para um valor de distância no intervalo da seção em análise, o algoritmo é finalizado, bastando somar a distância x com o valor das distâncias das seções de linha anteriores para que a localização da falta seja determinada.

Figura 4.18 – Modelo completo do alimentador de distribuição.

Uma das características principais dos sistemas de distribuição de energia é a presença de ramificações laterais nos alimentadores. Nos métodos de localização de faltas descrito nessa seção, a presença de ramificações laterais pode fazer com que uma determinada falta seja localizada em diversos pontos diferentes do sistema. Ou seja, a mesma falta, aplicada em locais diferentes pode induzir valores de tensão e corrente iguais na subestação.

No trabalho de Lee *et al.* (2004) é também proposta uma metodologia para a identificação da lateral na qual ocorreu a falta. O método é baseado na observação

dos padrões da corrente durante o tempo de isolamento da falta. Dadas as características dos diversos dispositivos de proteção presentes ao longo do alimentador (basicamente fusíveis e religadores) e suas localizações, é possível determinar, por meio da forma de onda da corrente na subestação, qual dispositivo atuou no isolamento da falta e com isso, determina-se a lateral. Além destas informações, o método utiliza a medida da quantidade de carga interrompida após a atuação da proteção, como indicativo da lateral envolvida na falta.

Assim, desenvolveu-se para utilização neste trabalho uma metodologia de análise que busca averiguar mapas de impedância e modificações das potências e sua evolução durante a falta.

Através da modelagem computacional dos circuitos, Figuras 4.19 à 4.21, é possível traçar diferentes mapas de impedâncias dos circuitos modelado em diferentes frequências, o que traz para um mesmo circuito representações diferentes, permitindo observar seu comportamento em diferentes frequências.

A impedância observada para uma determinada falta vai depender do comportamento do circuito perante essa falta, contendo todas as distorções harmônicas dos sinais de tensão e corrente de falta.

Comparando o mapa da variação da impedância Z_1 da Figura 4.19, com o mapa da variação da impedância Z_0 da Figura 4.20 para o alimentador INP1306, podem-se observar representações diferentes para um mesmo circuito.

Figura 4.19 – Impedância Z1 para o INP1306.

Figura 4.20 – Impedância Z0 para o INP1306.

Outra análise que também se configurou interessante foi à influência das componentes harmônicas da impedância fundamental. Quando da estimação da impedância da falta, uma característica elétrica de importante análise é a impedância fundamental estimada.

Tais fenômenos podem ser conferidos na Figura 4.21, onde um estudo de caso fora realizado para o alimentador MCI1305.

Figura 4.21 – Impedâncias harmônicas – MCI1305.

A figura acima mostra que a impedância harmônica também pode trazer varias representações para um mesmo circuito.

Desta maneira, elabora-se então o sistema de localização de faltas por múltiplas frequências, onde se permite obter também várias estimativas de local de falta, conforme ilustrado na Figura 4.22.

Figura 4.22 – Exemplo de localização de faltas com múltiplas frequências.

Da análise da figura anterior, observa-se que o ponto com os locais com a menor variância tende a ser aquele com maior probabilidade de ocorrência da falta. Assim, a variância será uma das métricas para se quantificar a probabilidade da falta ter acontecido em um determinado ponto.

Outro aperfeiçoamento realizado no sistema de identificação de faltas tem relação direta com as alterações de potência ativa e reativa durante a falta, as quais foram observadas por meio de diversas análises oscilográficas. Um exemplo de tais alterações pode ser conferido por meio da Figura 4.23.

Figura 4.23 – Detecção da alteração da potência ativa e reativa para uma oscilografia de falta.

As variações de potência pré-falta e pós-falta permitem colher informações que ajudam no processo de classificação de locais prováveis de falta. Quando da modelagem dos circuitos para localização de faltas é possível inferir para cada um dos possíveis caminhos elétricos desse circuito sua distribuição de carga. Quando da ocorrência de uma falta às potências após o ponto de falta são afetadas. Essa distribuição de carga se comparada com essas alterações de potência pré e pós falta podem fornecer informações importantes para o propósito de setorização do local mais provável da ocorrência do defeito.

A Figura 4.24 sintetiza a arquitetura do sistema para localização de faltas desenvolvida.

Figura 4.24 – Arquitetura do sistema de localização de faltas.

4.6 Mapas de impedâncias para discriminar seção faltosa

Um dos pontos mais importantes relacionados com a seleção da seção faltosa por qualquer mecanismo de localização relaciona-se com a escolha do trecho candidato que mais se assemelha com as características elétricas observadas durante a falta.

As análises consistem em investigar os mapas de resistência para R_0 e R_1 , além dos mapas de reatância X_0 e X_1 em função da distância.

Nas quatro figuras 4.25 a 4.28, a seguir, exemplificam-se os mapas de impedância para dois estudos de caso envolvendo os alimentadores pilotos INP1306 e MCI1305.

Figura 4.25 – Mapa de evolução da Reatância – INP1306.

Figura 4.26 – Mapa de evolução da Resistência – INP1306.

Figura 4.27 – Mapa de evolução da Reatância – MCI1305.

Figura 4.28 – Mapa de evolução da Resistência – MCI1305.

Mapas como os apresentados nos exemplos acima permitem inferir a influência da distância (em km) para o processo de estimação da impedância da falta, fornecendo-se assim caminhos de solução que contornam o problema da multi-estimação de seções faltosas.

4.7 Conversão de arquivos COMTRADE para auxiliar processos de localização de faltas pelo Centro de Operação da Distribuição

Com o aumento das aplicações de tecnologias digitais na medição, proteção e controle de sistemas elétricos de potência, tem-se criado uma grande quantidade de dados trafegados digitalmente. Os usuários desses dados se deparam com o problema de ter que lidar com diferentes formatos de arquivos usados pelos diversos sistemas de aquisição de dados existentes.

O formato COMTRADE (*IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange for Power Systems*) surgiu de modo a possibilitar a troca de informações a respeito de um determinado evento na rede. Nele é definido um padrão comum para a troca de dados digitais e mídias em sistemas elétricos de potência (IEEE C37.111, 1999).

Os arquivos definidos pelo COMTRADE devem estar a princípio em formato ASCII e são formados por um conjunto de arquivos. São definidos, para cada evento, três tipos de arquivos: cabeçalho, configuração e dados. Os arquivos são na forma "xxxxxxxxx.yyy" onde "xxxxxxxxx" é usado para identificar o evento e ".yyy" é usado para identificar o tipo do arquivo: ".HDR" para cabeçalho (HeaDeR), ".CFG" para configuração (ConFiGuration) e ".DAT" para dados (DATa), isto é:

Arquivos de Cabeçalho: Contém informações criadas pelo originador dos dados. Este arquivo deve ser lido ou impresso pelo usuário. Não existe qualquer formato específico, apesar de se aconselhar que tipo de informações deva ser escrito. O único cuidado ao gerá-lo é forçar o editor utilizado a salvar o texto em formato ASCII, sem usar os caracteres especiais de formatação específicos de cada editor.

Arquivos de Configuração: Devem ser lidos por um programa de computador e seu formato, conforme definido na norma, deve ser fielmente obedecido. Possui informações que permitirão interpretar corretamente os dados do transitório. Estas informações incluem itens como: taxas de amostragem, número de canais, frequência da linha, informação dos canais, etc.

Arquivos de Dados: Contém o valor de cada amostra de cada canal medido. O número guardado no arquivo será em formato inteiro, normalmente correspondente ao formato do equipamento digitalizador. No arquivo de configuração são especificados meios de traduzir estes valores adequadamente para grandezas reais, tais como Volts, Ampéres etc. O arquivo de dados pode estar em formato binário desde que se forneça juntamente um programa que o traduza para formato ASCII.

O COMTRADE define um formato comum para arquivos de dados digitais e mídias, necessários para troca de vários tipos de dados de perturbações, ensaios e simulação. Não há imposição sobre taxa de amostragem e resolução. Há a necessidade, entretanto, de enquadrar em grupos de taxa de amostragem que variam dentro de faixas predefinidas.

Para possibilitar o envio das informações de faltas ao COD, foi necessário o desenvolvimento de um código computacional para conversão dos dados dos

arquivos “.DAQ”, provenientes da placa de aquisição de dados instalada nas subestações, para COMTRADE.

Nas Figuras 4.29 e 4.30 é possível conferir um exemplo dos arquivos de configuração “.CFG” e dados “.DAT” de uma oscilografia gerada por uma falta simulada em uma das subestações em estudo. Tal simulação consistiu de se desconectar temporariamente uma das garras de corrente e conectá-la novamente.

```

1 MCI2305, SISFalta P&D EDP, 1999
2 6,6A,0D
3 1, IA, , , A, 1.5867e-006, -0.0023115, 0, -99999, 99999, 1, 1, p
4 2, IB, , , A, 1.5966e-006, -0.0019826, 0, -99999, 99999, 1, 1, p
5 3, IC, , , A, 1.5883e-006, -0.00083167, 0, -99999, 99999, 1, 1, p
6 4, UA, , , U, 7.1661e-005, -0.07828, 0, -99999, 99999, 1, 1, p
7 5, UB, , , U, 6.0204e-005, -0.013167, 0, -99999, 99999, 1, 1, p
8 6, UC, , , U, 6.2955e-005, -0.0090568, 0, -99999, 99999, 1, 1, p
9 60
10 1
11 7680.5, 30721
12 20/12/2012,13:13:28.974000
13 20/12/2012,13:13:28.974000
14 ASCII
15 1.0
16

```

sisFaltaFunction.m MCI2305_4108.cfg

ln 5 col 32 16 30 PC

Figura 4.29 – Exemplo de arquivo “.CFG” gerado pelo sistema instalado na SE.

```

1 98341,-20700,-57763,96521,-62102,-17880
2 97719,-17405,-61076,97649,-57416,-22696
3 96268,-14109,-63353,98264,-52937,-27773
4 95439,-10813,-65217,99448,-48567,-33686
5 95439,-9578,-66045,98645,-43908,-38064
6 95439,-8342,-65838,98182,-39604,-43178
7 96683,-7312,-65424,97324,-35687,-48553
8 96683,-6488,-65217,96020,-32197,-53687
9 96268,-4634,-65217,94685,-28663,-58660
10 95232,-2163,-65838,93414,-25172,-63262
11 93781,1545,-67287,92134,-21245,-66976
12 91087,6076,-69565,91482,-16591,-70356
13 87978,11019,-72670,90716,-11604,-72988
14 83004,15551,-75155,89949,-6038,-74644
15 77201,20906,-78260,89559,205,-76091
16 70569,26879,-81573,88692,6508,-77083
17 63108,32234,-84885,87572,12883,-78050
18 56260,30026,-87706,86106,10106,-70162

```

sisFaltaFunction.m MCI2305_4108.cfg MCI2305_4108.dat

ln 1 col 1 30722 39 PC

Figura 4.30 – Exemplo de arquivo “.DAT” gerado pelo sistema instalado no alimentador MCI1305.

Em se tratando de um estudo inovador, e pela necessidade de duplicidade de informações nas bases do centro de operação, a nomenclatura do alimentador recebeu novo nome para os propósitos desse trabalho.

No Apêndice D, se encontra registrado o código que realiza a conversão dos arquivos “.DAQ”, para COMTRADE.

Um enfoque especial deve ser dado aos processos envolvendo a adequação dos padrões de sincronismo de arquivos necessários ao envio das informações de faltas pela central remota instalada na subestação ao Centro de Operações da Distribuição (COD).

Na maioria das vezes, tais arquivos são compactados em um único envelope, para facilitar os processos de transmissão e possuem uma nomenclatura específica para que o sistema consiga interpretar os dados.

Para o sincronismo realizado nos estudos pilotos, destacam-se dois arquivos que necessitam ter nomenclatura padronizada e também estar compactados.

O primeiro arquivo, REL_OSC_QMCI2305.ZIP, cuja nomenclatura indica que se trata dos relatórios de oscilografias do alimentador MCI2305, é o envelope responsável pelos arquivos COMTRADE propriamente ditos, englobando os arquivos “.CFG”, “.HDR” e “.DAT”. O arquivo “.HDR” apesar de não possuir nenhum formato específico, não será utilizado para os propósitos de envio das informações de localização de faltas.

Na Figura 4.31 tem-se o exemplo do conteúdo de um arquivo “.ZIP” proveniente de uma simulação de falta realizada em uma das subestações em estudo.

Figura 4.31 – Conteúdo do arquivo “.ZIP” gerado pelo sistema instalado na SE.

O segundo arquivo a ser sincronizado possui extensão “.GZ” e se trata do relatório de eventos, em formato “.CSV”, compactado. A nomenclatura inicial deste arquivo segue o padrão REL_EVE_QMCI2305 identificando que se trata do relatório de eventos das faltas identificadas pelo sistema em estudo.

Na Figura 4.32 tem-se um exemplo do conteúdo do arquivo “.CSV” advindo do mesmo evento simulado e apresentado nas figuras anteriores.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5
1	3.810410500000000e+007	7.409142400000000e+008	2.299862179999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
2	3.810223800000000e+007	7.409087900000000e+008	2.294057150999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
3	3.810781100000000e+007	7.409064600000000e+008	2.286270230999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
4	3.817787000000000e+007	7.409152270000000e+008	2.360656649999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
5	3.823317300000000e+007	7.408748830000000e+008	2.447276715999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
6	3.823459100000000e+007	7.408786010000000e+008	2.446329748999997e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
7	3.822520600000000e+007	7.408892830000000e+008	2.424766427999997e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
8	3.821830200000000e+007	7.408881260000000e+008	2.417766151999997e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
9	3.820799100000000e+007	7.408936410000000e+008	2.405921957999997e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
10	3.820586300000000e+007	7.408953200000000e+008	2.403382089999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
11	3.820300800000000e+007	7.408950730000000e+008	2.401293989999997e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
12	3.822526900000000e+007	7.409171100000000e+008	2.433524740999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
13	3.822219300000000e+007	7.409153010000000e+008	2.429956231999997e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
14	3.821319400000000e+007	7.409062040000000e+008	2.416978633999997e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
15	3.821316400000000e+007	7.409061550000000e+008	2.416921179999997e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
16	3.821116100000000e+007	7.409028370000000e+008	2.413004546899997e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
17	3.821013600000000e+007	7.409024400000000e+008	2.411946271999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
18	3.820505800000000e+007	7.409004720000000e+008	2.406500253999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
19	3.820365500000000e+007	7.408959710000000e+008	2.401785658999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
20	3.820339300000000e+007	7.408951300000000e+008	2.400904792999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
21	3.820223600000000e+007	7.408914190000000e+008	2.397017612999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
22	3.819153600000000e+007	7.408944870000000e+008	2.385793091999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
23	3.817909400000000e+007	7.408908469000000e+008	2.366761185999997e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
24	3.817714100000000e+007	7.409119800000000e+008	2.362743558999997e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
25	3.817567500000000e+007	7.409152680000000e+008	2.359143544999997e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
26	3.817474100000000e+007	7.409173110000000e+008	2.356897168999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
27	3.817422200000000e+007	7.409184520000000e+008	2.355642847999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
28	3.817362000000000e+007	7.409197640000000e+008	2.354200161999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
29	3.817326700000000e+007	7.409205620000000e+008	2.353427378999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
30	3.817134200000000e+007	7.409196910000000e+008	2.351314497999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										
31	3.815148200000000e+007	7.409148990000000e+008	2.330791137999998e+004	0.000000000000000e+000	0.000000000000000e+000										

Figura 4.32 – Exemplo de arquivo “.GZ” gerado pelo sistema instalado no alimentador MCI1305.

Após uma bem sucedida identificação de faltas, os arquivos “.GZ” e “.ZIP” são gerados e salvos numa pasta previamente definida no software. A varredura desta pasta fica por função da Remota H5-SE, que periodicamente a inspeciona em busca de novos arquivos.

Norma COMTRADE permite até 999999 canais entre digitais e analógicos. As informações para os propósitos de localização podem ser inseridas no processo de conversão, dentro do arquivo COMTRADE caso desejável. O formato normatizado do COMTRADE reduz consideravelmente o tamanho do arquivo, favorecendo a comunicação.

4.8 Implementação de sistema de comunicação em tempo real

As ferramentas instaladas nos alimentadores tratam os distúrbios em tempo real, resultando em informações processadas das faltas, adequadas aos padrões de sincronismo de arquivos necessários para envio dessas informações do campo ao Centro de Operações da Distribuição.

O sistema de localização de faltas desenvolvido encontra-se em funcionamento em computadores do tipo PC. Após a ocorrência de um transitório, as informações locais são processadas neste computador para a determinação das características de falta.

Caso seja constatada uma falta, todos os mecanismos responsáveis por determinar o local da falta são realizados e os resultados para o auxílio à tomada de decisões são armazenados em um banco de dados neste computador local.

As informações sobre as faltas identificadas que serão armazenadas nesse banco de dados são aquelas apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Banco de Dados (armazenamento das informações de faltas).

Campo	Tipo	Descrição
id	Inteiro (10 posições)	Campo de identificação, único, incrementado automaticamente.
est_tempo	Tempo (aaaa/mm/dd HH:MM:SS)	Estampa de tempo da primeira oscilografia processada.
tipo_falta	Caractere (6 posições)	Classificação da Falta: FFF, DLFAB, DLFBC, DLFA, FFTAB, FFTBC, FFTCA, FFP_A, FFP_B, FFP_C, FFS_A, FFS_B e FFS_C.
distancia_falta	Real (9 posições, 6 casas decimais)	Distância da falta à subestação
resistencia_falta	Real (9 posições, 6 casas decimais)	Resistência da falta calculada pelo sistema
tot_err_contabil	Inteiro	Quantidade de respostas possíveis
indice_confiabil	Inteiro	Ordem da resposta
cod_confi_inf	Inteiro	Código da confiabilidade associada ao local da falta
grau_acerto_confiabil	Real (9 posições, 6 casas decimais)	Qualidade da resposta em termos de percentual

Um exemplo desse banco de dados pode ser visto na Figura 4.33.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	id	Data/Hora	Tipo de Falta	Distância da Falta	Resistência da Falta	Possibilidades	Possibilidade	Código da confiabilidade	Acerto Confiabilidade
186	1316	17/10/2011 19:57:50	DLFBC	3.508109	1.025415	8	8	95460	0.099656
187	1315	17/10/2011 19:57:50	DLFBC	3.508109	1.025415	8	7	95424	0.175258
188	1314	17/10/2011 19:57:50	DLFBC	3.508109	1.025415	8	6	61922	0.16323
189	1313	17/10/2011 19:57:50	DLFBC	3.508109	1.025415	8	5	27366	0.109966
190	1312	17/10/2011 19:57:50	DLFBC	3.508109	1.025415	8	4	20740	0.109966
191	1311	17/10/2011 19:57:50	DLFBC	3.508109	1.025415	8	3	16850	0.142612
192	1310	17/10/2011 19:57:50	DLFBC	3.508109	1.025415	8	2	2464	0.092784
193	1309	17/10/2011 19:57:50	DLFBC	3.508109	1.025415	8	1	1873	0.106529
194	1308	25/09/2011 10:47:05	DLFAB	12.212295	8.903498	6	6	97443	0.170732
195	1307	25/09/2011 10:47:05	DLFAB	12.212295	8.903498	6	5	91576	0.134146
196	1306	25/09/2011 10:47:05	DLFAB	12.212295	8.903498	6	4	64047	0.14745
197	1305	25/09/2011 10:47:05	DLFAB	12.212295	8.903498	6	3	33467	0.260532
198	1304	25/09/2011 10:47:05	DLFAB	12.212295	8.903498	6	2	26062	0.149667
199	1303	25/09/2011 10:47:05	DLFAB	12.212295	8.903498	6	1	18905	0.137472

Figura 4.33 – Banco de dados de faltas.

Para que o operador possa interpretar as informações dos prováveis locais da falta como um alarme, foram então definidas como variáveis de saída em tempo

real o Código de Confiabilidade com no máximo quatro prováveis locais para uma falta em sequência, a Distância da Falta e Tipo de Falta.

Para o envio das oscilografias, e alarmes, tais informações precisam, através de um mecanismo de comunicação eficiente, serem rapidamente arquivadas em uma base de acessível aos operadores do COD.

Os protocolos padrões de comunicação utilizados e disponíveis nas quatro ETDs objetos do estudo piloto são o DNP3 serial, DNP3 encapsulado, MODBUS e TCP.

O envio das informações é feito com a utilização de uma remota que faz o envio dos arquivos COMTRADE. A remota cria uma rede virtual entre a ETD piloto e o PC para estudos no COD, conforme ilustrado na Figura 4.34.

Figura 4.34 – Rede virtual entre a ETD piloto e COD.

Assim que novos arquivos são identificados na ETD desde o último ciclo de varredura, estes são então transmitidos da subestação para o COD.

4.9 Considerações parciais

As compilações dos resultados preliminares obtidos a partir da aplicação do sistema automatizado apresentado na Seção 4.2 demonstram que as técnicas

desenvolvidas fornecem resultados precisos, identificando e localizando de forma automática as diversas ocorrências de faltas observadas no sistema de distribuição.

O método inovador desenvolvido para fins de modelagem de alimentadores agrega maior confiabilidade ao sistema como um todo.

Os aspectos de método inovador para o propósito de localização de faltas, agregado aos mapas de impedância de faltas, ajudam a contornar o problema da multi-estimação de regiões faltosas.

A conversão dos arquivos em COMTRADE e a utilização de um meio rápido e confiável de comunicação, com alarmes e informações bem definidas sobre os prováveis locais de uma falta, contribuem com as atividades dos operadores do COD.

5. Resultados Experimentais

5.1 Introdução

A importância e relevância do tema deste trabalho permitiu levantar os principais aspectos relacionados com a implementação eficiente de processos envolvidos com a identificação, localização e comunicação de faltas, cujos resultados podem beneficiar os tempos de restabelecimento do sistema.

Um dos objetivos principais desse trabalho foi estudar como disponibilizar uma ferramenta em forma de um sistema integrado que auxilie os operadores do sistema de distribuição a tomarem decisões acertadas, contribuindo assim para o aumento dos índices de qualidade e, conseqüentemente, aumento do nível de satisfação de seus clientes.

Por meio da constituição de um banco de dados de ocorrências de faltas, tornar-se-á viável a elaboração de estratégias ou metodologias que auxiliem não apenas a operação do sistema, mas também a área de engenharia e de planejamento da manutenção da concessionária como um todo.

5.2 Análise comparativa entre registros oscilográficos e eventos

A fim de validar o sistema desenvolvido, o processo de cruzamento das oscilografias apresentou grandes desafios, tendo-se em vista o número de registros envolvidos com as análises. Três análises distintas foram realizadas.

A primeira análise, com o objetivo de identificar faltas permanentes, consistiu em buscar o cruzamento de datas obtidas nas oscilografias com as tabelas de desligamentos dos circuitos em estudo.

A segunda análise, com o objetivo de identificar faltas transitórias, consistiu em buscar o cruzamento de datas obtidas nas oscilografias com os registros dos dispositivos de proteção (disjuntores e religadoras).

As Figuras 5.1 e 5.2 representam graficamente como foram os procedimentos realizados nas duas primeiras análises.

Figura 5.1 – Cruzamento (fase 1).

Figura 5.2 – Cruzamento (fase 2).

Após estas duas primeiras, uma terceira etapa procurou identificar distúrbios de faltas registrados pelo sistema de aquisição instalado nos alimentadores pilotos,

mas que não foram capazes de sensibilizar os dispositivos de proteção. A terceira fase de análises consistiu basicamente de abrir e analisar as oscilografias registradas.

Como resultado, uma tabela auxiliar fora confeccionada, com os seguintes campos de interesse:

- Ordem ID
- Data do conhecimento
- Data do completo campo
- Duração (m)
- Instalação de Referência
- Consumidores Afetados
- Classe
- Causa
- Proteção
- Oscilografias

As duas últimas colunas desta tabela referem-se aos dispositivos de proteção envolvidos na falta, responsáveis por removê-la e também aos códigos de oscilografias associados com os eventos.

O objetivo principal de se colher oscilografias foi aquele de identificar situações tais, de modo que pudessem representar importantes fenômenos transitórios e que, devidamente caracterizados, permitam ajustes nos modelos computacionais dos alimentadores pilotos. Este é o caso que será apresentado como exemplo neste capítulo, tomando-se para análise uma ocorrência cuja Ordem ID foi a 1671236.

Esta Ordem ID está relacionada a uma interrupção com duração de 100 minutos, afetando 7908 clientes. A classe desta ocorrência foi registrada como sendo “**201-Ocor.c/ desl.de equip.Prim.**” cuja causa foi “**491-Deterioração Equipamento**”. A instalação de referência obtida nos primeiros processos de cruzamento de informação apontam para o elemento CF(175CF00000054), sendo que a proteção responsável por remover a falta foi o religador RL-505992. A primeira oscilografia de um total de quatro fora registrada no dia 14/10/2011 (às 22h46), sendo que a hora do conhecimento desta ordem está registrada como sendo em 14/10/2011(às 22h51). Na Figura 5.3 tem-se uma visualização geral desta oscilografia, sendo que na Figura 5.4 tem-se em detalhes o momento do distúrbio.

Figura 5.3 – Oscilografia JCE1312-71 completa.

Figura 5.4 – Detalhe da oscilografia JCE1312-71.

É possível observar, a partir da Figura 5.4, duas fases participantes da falta, pois se tem a elevação das correntes e também o afundamento de tensão. A evolução desta falta, apresentadas nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, mostra algo bem interessante.

Figura 5.5 – Detalhe da oscilografia JCE1312-72.

Figura 5.6 – Detalhe da oscilografia JCE1312-73.

Figura 5.7 – Detalhe da oscilografia JCE1312-74.

A corrente de falta, inicialmente próxima dos 500 A, envolvia duas fases. Em seguida, esta falta evoluiu para uma falta com corrente próxima dos 1000 A. A última oscilografia registrada aponta as três fases participantes da falta.

Sem nenhum conhecimento, além daqueles apresentados pelas oscilografias, torna-se bastante complexo relacionar a falta com o fenômeno responsável pela sua ocorrência. Mas, analisando-se os registros das ações executadas no alimentador JCE1312 naquele período, fica-se então evidente que o sistema conseguiu oscilografar uma falta muito interessante.

São três os registros relacionados a esta Ordem ID, os quais se distinguem entre si no campo “Categoria”, sendo estes: “CLIMA”, “CONDIÇÃO FIO – PROTEÇÃO” e “03 - CABOS (FIOS)”. O clima era considerado instável a ponto de se ter provocado o rompimento dos cabos, sendo que a proteção não atuou (segundo o relatório). Não há detalhamento no relatório de quais fases participaram da falta, mas fica evidente que todas participaram, tendo-se em vista as oscilografias registradas no último momento.

O arquivo complementar, com um comentário a respeito da interrupção, aponta as seguintes informações: “CKT NAO DESLIGOU TRECHO FOI MANOBRADO E SOCORRIDO /CAUSA DO CABO PARTIDO FOI CONEXAO MAL FEITA”.

Este comentário comprova que realmente fora uma falta diferenciada que acometeu o circuito JCE1312, tendo-se em vista que o cabo se partiu e o transitório resultante apresentou níveis elevadíssimos de corrente, o qual não condiz com situações de alta impedância. No entanto, a proteção não atuou, sendo que será assim possível caracterizar esta situação como sendo de especial interesse para propósitos de modelagem computacional.

5.3 Análise de oscilografias referentes às faltas dos alimentadores piloto

Neste capítulo apresentar-se-ão os resultados obtidos com algumas análises de oscilografias registradas pelos sistemas instalados nos quatro alimentadores piloto. Para essas análises foi aplicada a metodologia exemplificada na Seção 5.3.

Para a ETD JCE1312, foram avaliadas 95 oscilografias entre 20/09/2011 e 20/12/2011. Em termos de relatórios de desligamentos, foram avaliados 558 registros entre 31/08/2011 e 29/02/2012. Para os dispositivos de proteção, foram 384 registros para o DJ-22 entre 22/10/2011 e 23/02/2012 e para todos os RL foram 31203 registros entre 31/08/2011 e 29/02/2012. O resultado destas investigações pode ser conferido na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Cruzamento de oscilografias para JCE1312.

Ordem ID	Data do conhecimento	Data do completo campo	Duração (m)	Instalação de Referência	Consumidores Afetados	Classe	Causa	Proteção	Oscilografias
1690559	01/10/2011 21:56	02/10/2011 01:52	236	RL(175RE00002178)	1151	201	180	RL-002178	51-55
1666696	05/10/2011 18:24	05/10/2011 20:15	111	ET-000390(1091533)	19	201	180	RL-505992	58
1670851	14/10/2011 11:02	14/10/2011 11:54	52	DJ(RJCE 1312)	11582	201	180	DJ-22	66-70
1671236	14/10/2011 22:51	15/10/2011 00:31	100	CF(175CF000000054)	7908	201	491	RL-505992	71-74
1672014	16/10/2011 10:19	16/10/2011 13:00	161	RL(175RE000505996)	105	201	491	RL-509996	80-81
1672216	16/10/2011 15:57	16/10/2011 18:40	163	RL(175RE000505996)	185	201	491	RL-509996	83-85
	20/10/2011 00:12							RL-509996	87
1676583	25/10/2011 21:07	25/10/2011 22:35	88	RL(175RE000505990)	70	201	11	RL-505990, RL-505994, RL-2178	90-94
1679479	30/10/2011 09:29	30/10/2011 13:35	246	RL(175RE00001942)	1510	201	180	RL-1942, RL-518572, RL-2178	101-105
1679640	30/10/2011 12:40	30/10/2011 14:15	95	RL(175RL000518572)	2205	201	20	RL-1942, RL-518572, RL-2178	101-105
1679784	30/10/2011 14:40	30/10/2011 17:13	153	RL(175RE00002178)	1151	201	890	RL-1942, RL-518572, RL-2178	101-105
1679864	30/10/2011 19:34	31/10/2011 11:15	941	RL(175RE00001942)	359	201	180	RL-1942	106-107
1674410	04/11/2011 12:12	04/11/2011 17:14	302	ET005155839	260	244	970	RL-505992	110-111
1680954	04/11/2011 16:50	04/11/2011 17:14	24	ET005155839	260	244	970	RL-505992	110-111
	11/11/2011 15:43							DJ-22, RL-505992	112
1686050	13/11/2011 19:05	14/11/2011 00:45	340	BF00000711	4	201	11	RL-2178	113
1687367	15/11/2011 10:07	15/11/2011 11:50	103	ET-00525579(341280)	10	201	180	RL-2178	114-115
1687295	15/11/2011 08:25	15/11/2011 16:13	468	BF00504981	5	201	20	RL-2178	114-115
1687610	15/11/2011 15:25	15/11/2011 18:20	175	ET-001921(00318269)	3	201	181	RL-505992	116-117
1687660	15/11/2011 16:39	15/11/2011 20:55	256	BF00000157	24	201	180	RL-50992	118-119
1687708	15/11/2011 17:32	15/11/2011 23:15	343	BF00001846	12	201	180	-	120-123
1689563	19/11/2011 10:28	19/11/2011 11:45	77	BF00000849	172	201	180	RL-2178	124-130
1689568	19/11/2011 10:36	19/11/2011 14:45	249	ET-005017(1092231)	1	201	180	RL-2178	124-130
1690363	21/11/2011 10:37	21/11/2011 13:25	168	BF00000995	9	201	181	RL-505994	131
1690559	21/11/2011 14:57	21/11/2011 14:59	2	RL(175RE000505992)	359	201	890	RL-505992	132-133
1690918	22/11/2011 11:39	22/11/2011 12:48	69	RL(175RL000518572)	3360	201	20	RL-2178, RL-505996, RL-505990, RL-518572	134
1692166	24/11/2011 08:09	24/11/2011 10:46	157	BF00000939	3	201	11	RL-505994	135

Como é possível observar da Tabela 5.1, existem registros com e sem Ordem ID. Aqueles que possuem este campo foram as oscilografias referentes à faltas permanentes. Já os que não possuem estão relacionados às faltas transitórias.

Para a ETD BIR1305, foram avaliadas 310 oscilografias entre 04/10/2011 e 20/12/2011. Em termos de relatórios de desligamentos, foram avaliados 303

registros entre 31/08/2011 e 27/02/2012. Para os dispositivos de proteção, os seguintes registros foram avaliados:

- DJ-19: 459 registros entre 31/08/2011 e 25/02/2012.
- RL-071532: 2093 registros entre 31/08/2011 e 29/02/2012.
- RL-071618: 2751 registros entre 31/08/2011 e 29/02/2012.
- RL-071619: 1496 registros entre 31/08/2011 e 29/02/2012.
- RL-529204: 4560 registros entre 31/08/2011 e 29/02/2012.

O resultado destas investigações pode ser conferido na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Cruzamento de oscilografias para BIR1305.

Ordem ID	Data do conhecimento	Data do completo campo	Duração (m)	Instalação de Referência	Consumidores Afetados	Classe	Causa	Proteção	Oscilografias
1669771	12/10/2011 00:23:00	12/10/2011 01:50	87	RL(130RE00071618)	459	201	491	DJ 19, RL-071532, RL-071618 e RL-071619	23-25
	12/10/2011 01:50:00							RL-071618	27
	16/10/2011 18:33:00							RL-529204	52-55
1672672	17/10/2011 15:41:00	17/10/2011 18:00	139	RL(130RL00529204)	376	201	890	RL-529204	59
	17/10/2011 18:31:00							RL-529204	61
	19/10/2011 14:34:00							RL-529204	68
	19/10/2011 16:14:00							RL-529204	70
1674138	19/10/2011 21:28:00	20/10/2011 12:30	902	ET-005972(1092123)	24	201	182	RL-529204	80
1676750	25/10/2011 22:33:00	25/10/2011 23:31	58	DJ(RBIR 1305)	2049	201	890	RL-071618 e RL-529204	89-91
	25/10/2011 23:23:00							RL-071618	92
1677143	26/10/2011 11:08:00	26/10/2011 17:12	364	BF(130BF00001379)	42	201	180	RL-071532	96-97
1677325	26/10/2011 17:20:00	26/10/2011 19:44	144	DJ(RBIR 1305)	3587	201	491	RL-071532, RL-071618 e RL-529204	99-103
	29/10/2011 07:55:00							RL-071532	113
	29/10/2011 17:15:00							RL-071532	115-116
1683504	08/11/2011 15:41:00	08/11/2011 17:10	89	BF(130BF00000981)	42	201	180	DJ 19, RL-071532 e RL-071618	128-129
1684616	11/11/2011 08:29:00	11/11/2011 10:21	112	BF(130BF00000292)	21	102	181	RL-071532	135
1685361	12/11/2011 16:11:00	12/11/2011 21:50	339	BF(130BF00000289)	113	201	491	RL-071532	136-137
1687280	15/11/2011 07:46:00	15/11/2011 10:00	134	BF(130BF00000284)	55	201	180	RL-071532	140
1687413	15/11/2011 10:55:00	15/11/2011 14:10	195	BF(130BF00000981)	42	201	181	RL-071618	141
1688341	16/11/2011 18:11:00	16/11/2011 20:36	145	BF(130BF00000288)	129	201	180	RL-071532	149
1689838	20/11/2011 07:03:00	20/11/2011 08:20	77	ET-001769(00297183)	4	201	491	RL-071532	158
	22/11/2011 17:10:00							DJ 19 e RL-071618	201
1691911	23/11/2011 14:38:00	23/11/2011 17:28	170	BF(130BF00001035)	35	201	180	RL-071532	203
	24/11/2011 22:00:00							RL-071532	206
1693501	27/11/2011 09:00:00	27/11/2011 10:31	91	BF(130BF00001193)	31	201	200	RL-071618	209
	01/12/2011 09:08:00							DJ 19 e RL-071618	222
1696416	01/12/2011 16:38:00	01/12/2011 19:01	143	ET-002610(00200413)	11	201	130	RL-071532	225-226
1696488	01/12/2011 17:16:00	01/12/2011 20:08	172	ET-006599(1090787)	48	201	20	RL-071618	234
	07/12/2011 19:24:00							RL-071618	238
1700756	08/12/2011 05:06:00	08/12/2011 07:52	166	BF(130BF00000981)	42	201	180	RL-071618	241
1702714	10/12/2011 00:57:00	10/12/2011 09:30	513	BF(130BF00000379)	29	201	180	RL-071619	249
1705676	15/12/2011 02:42:00	15/12/2011 06:05	203	BF(130BF00000401)	100	201	180	RL-071619	268
1706912	16/12/2011 17:55:00	16/12/2011 19:08	73	ET-012715(0)	0	199	816	RL-071532	280
1709272	19/12/2011 22:28:00	20/12/2011 01:38	190	BF(130BF00000288)	131	201	300	RL-071532	303-304

Para a ETD MCI1305, foram avaliadas 1384 oscilografias entre 14/09/2011 e 20/12/2011. Em termos de relatórios de desligamentos, foram avaliados 364 registros entre 31/08/2011 e 29/02/2011. Para os dispositivos de proteção, os seguintes registros foram avaliados:

- DJ-25: 519 registros entre 03/09/2011 e 29/02/2012.
- RL-071354: 3356 registros entre 04/09/2011 e 29/02/2012.
- RL-503100: 5124 registros entre 31/08/2011 e 29/02/2012.

- RL-509427: 4748 registros entre 31/08/2011 e 17/01/2012.
- RL-513579: 2086 registros entre 31/08/2011 e 29/02/2012.

O resultado destas investigações pode ser conferido na Tabela 5.3. É possível observar nesta tabela que existem registros onde apenas constam a data do conhecimento e o código correspondente da oscilografia. Tais registros referem-se a distúrbios que não foram sensibilizados pelos dispositivos de proteção, mas que pelas características elétricas podem ser caracterizados como faltas.

Tabela 5.3 – Cruzamento de oscilografias para MCI1305.

Ordem ID	Data do conhecimento	Data do completo campo	Duração (m)	Instalação de Referência	Consumidores Afetados	Classe	Causa	Proteção	Oscilografias
	22/09/2012 09:01:00							RL-503100 e RL-509427	53
	22/09/2012 14:49:00							RL-503100	58
1659773	23/09/2011 16:05:00	23/09/2011 18:01:00	116	BF(130BF00000906)	27	201	180	RL-071354 e RL-509427	65
1659761	23/09/2011 16:12:00	24/09/2011 02:27:00	615	BF(130BF00001114)	30	201	180	RL-509427	66
1659105	25/09/2011 16:09:00	25/09/2011 16:18:00	9	130RE000713549	513	244	970	RL-071354	72
1663575	30/09/2011 13:26:00	30/09/2011 15:20:00	114	BF(130BF00000159)	26	201	20	RL-503100	77
1664720	02/10/2011 20:19:00	02/10/2011 22:51:00	152	BF(130BF00001580)	146	201	11	RL-071354 e RL-503100	81
	03/10/2012 03:46:00							RL-071354	83
1665534	03/10/2011 17:21:00	03/10/2011 18:40:00	79	ET-011896(1083631)	2	201	20	RL-071354 e RL-503100	87
1665848	04/10/2011 13:00:00	04/10/2011 18:25:00	325	RL(130RE00513579)	124	201	181	DJ-25, RL-071354, RL-503100 e RL-509427	89-93
1667240	07/10/2011 08:57:00	07/10/2011 09:58:00	61	BF(130BF00000906)	27	201	180	RL-071354 e RL-503100	104
1668296	09/10/2011 02:02:33	09/10/2011 02:02:33	0	130DJMCI025	0	500	890	RL-071354 e RL-503100	112
1670528	13/10/2011 21:34:00	13/10/2011 22:54:00	80	BF(130BF00002202)	24	201	180	RL-071354 e RL-503100	122
1672484	17/10/2011 07:54:00	17/10/2011 15:40:00	466	BF(130BF00001119)	8	201	181	RL-071354 e RL-503100	191-193
1674168	20/10/2011 01:11:00	20/10/2011 04:42:00	211	BF(130BF00001091)	64	201	181	RL-071354, RL-503100 e RL-509427	240-241
1676627	25/10/2011 21:28:00	26/10/2011 13:43:00	975	RL(130RE00503100)	748	201	180	DJ-25, RL-071354 e RL-503100	435-539
1676627	25/10/2011 21:28:00	26/10/2011 13:43:00	975	RL(130RE00503100)	748	201	180	DJ-25, RL-071354, RL-503100 e RL-513579	540-542
1676627	25/10/2011 21:28:00	26/10/2011 13:43:00	975	RL(130RE00503100)	748	201	180	DJ-25, RL-071354 e RL-503100	543-558
1676835	26/10/2011 00:29:14	26/10/2011 00:29:14	0	130DJMCI025	0	500	890	DJ-25, RL-071354, RL-503100 e RL-513579	561-562
1680301	31/10/2011 15:52:00	31/10/2011 17:31:00	99	DJ(RMCI 1305)	4530	201	321	DJ-25, RL-071354, RL-503100 e RL-513579	576-579
1673141	02/11/2011 09:59:00	02/11/2011 10:54:00	55	130ET000093929	4	244	970	DJ-25	593
	02/11/2011 13:13:00							DJ-25	595-596
1682928	06/11/2011 20:38:00	07/11/2011 00:36:00	238	RL(130RE00513579)	124	201	180	DJ-25, RL-503100, RL-513579	599
	11/11/2011 04:22:00							RL-071354	620-622
	10/11/2011 08:03:00							RL-513579	612-616
	12/11/2011 07:11:00							DJ-25, RL-071354, RL-503100, RL-509427	623-630
	18/11/2011 00:47:00							RL-071354, RL-503100	658
1690046	20/11/2011 15:35:00	20/11/2011 15:50:00	15	BF00001575	128	201	492	RL-509427	663-665
1700548	07/12/2011 18:11:00	07/12/2011 21:35:00	204	BF00000159	26	201	11	RL-071354, RL-503100	743-753
1700992	08/12/2011 14:18:00	08/12/2011 15:43:00	85	RL(130RE00071354)	515	201	181	RL-071354, RL-503100	770-780
1701019	08/12/2011 14:52:00	08/12/2011 18:40:00	228	PEE(B000377798)	1	350	492	RL-071354, RL-503100	770-780
1701053	08/12/2011 15:23:00	08/12/2011 17:12:00	109	BF00001060	18	201	180	RL-071354, RL-503100	770-780
	09/12/2011 00:58:00							DJ-25, RL-513579	801
1702321	09/12/2011 13:40:00	09/12/2011 15:12:00	92	BF00000159	26	201	20	RL-503100	840
	10/12/2011 17:33:00							RL-503100	909
1704266	12/12/2011 22:28:00	13/12/2011 02:03:00	215	BF00001060	26	201	300		938-940
1705687	15/12/2011 04:18:00	15/12/2011 08:50:00	272	BF00001060	18	201	180		1014-1019
1705993	15/12/2011 13:22:00	15/12/2011 15:45:00	143	BF00508422	2	201	180	todos os RL	1066
1706384	15/12/2011 21:21:00	15/12/2011 23:30:00	129	BF00001091	65	201	180	RL-071354, RL-503100, RL-509427	1068-1069
1708342	18/12/2011 19:17:00	18/12/2011 22:35:00	198	BF00001119	8	201	491		1340-1347
	19/12/2011 13:49:00								1369

Para a ETD INP1306, foram avaliadas 17971 oscilografias entre 13/09/2011 e 20/12/2011. Os relatórios de desligamentos para esta ETD estavam indisponíveis. Assim, procedeu-se com as fases dois e três das análises apenas. Para os dispositivos de proteção foram avaliados 175 registros entre 13/09/2011 e 23/02/2012. Cabe ressaltar que nenhum cruzamento foi encontrado para esta ETD.

Com base nos arquivos das ações envolvendo as ocorrências tratadas fora possível traçar um perfil com diversos casos de situações reais de faltas e que serviram para aperfeiçoar os modelos computacionais dos alimentadores pilotos.

Dentre tais atividades destaca-se a identificação das distâncias envolvendo as ocorrências, pois estas permitiram validar os procedimentos de localização de faltas fundamentados na determinação da confiabilidade mais próxima do local de ocorrência de uma falta.

A validação dos resultados torna-se complexa em circuitos reais de distribuição, devido a não linearidade das variáveis envolvidas nas faltas e também a falta do registro do local exato da ocorrência de uma falta, registrado muitas vezes como sendo o local do equipamento de proteção atuado, sua confiabilidade mais próxima, principalmente em faltas transitórias.

Assim, para os quatro alimentadores pilotos, foram realizadas diversas etapas de cruzamento de informações, nos mais diversos tipos de arquivos, sendo que um resumo do que fora encontrado para cada alimentador pode ser conferido nas Tabelas 5.4 a 5.7 a seguir:

Tabela 5.4 – Cruzamento de informações oscilográficas – JCE1312.

Parâmetro	Valor
Registros de desligamentos processados	557
Registros de proteção (DJ e RL) processados	15833
Registros de ações processados	637
Registros de comentários processados	557
Número de oscilografias processadas	94
Número de oscilografias úteis para modelagem	80
Número de casos distintos encontrados	27
Número de casos envolvendo DJ	2
Número de casos envolvendo RL	25
Número de casos com referência direta de distância	4
Número de casos não relatados em base de dados	2
Percentual de faltas trifásicas (%)	25.92
Percentual de faltas monofásicas (%)	29.63
Percentual de faltas fase-fase (%)	7.40
Percentual de faltas de outro tipo ou não identificadas (%)	37.05
Percentual de ocorrência com maior incidência <i>Causa 180 – Galho de Arvores (%)</i>	37.03
Percentual de ocorrência (%) <i>Causas 011 (Descarga Atmosférica) + 020 (Vento Forte)</i>	22.22
Percentual de ocorrência com menor incidência (%) <i>Causa 890 – Causas não determinadas</i>	7.40
Percentual de categoria com maior incidência (%) <i>Categoria Clima chuvoso</i>	29.62
Percentual de ocorrência (%) <i>Categoria Cabo rompido</i>	11.11
Percentual de categoria com menor incidência (%) <i>Categoria Ventania / Religador colocado em operação</i>	3.70

Tabela 5.5 – Cruzamento de informações oscilográficas – INP1306.

Parâmetro	Valor
Registros de desligamentos processados	426
Registros de proteção (DJ e RL) processados	175
Registros de ações processados	2025
Registros de comentários processados	426
Número de oscilografias processadas	273
Número de oscilografias úteis para modelagem	15
Número de casos distintos encontrados	5
Número de casos envolvendo DJ	-
Número de casos envolvendo RL	-
Número de casos com referência direta de distância	1
Número de casos não relatados em base de dados	-
Percentual de faltas trifásicas (%)	20.0
Percentual de faltas monofásicas (%)	0.0
Percentual de faltas fase-fase (%)	20.0
Percentual de faltas de outro tipo ou não identificadas (%)	60.0
Percentual de ocorrência com maior incidência <i>Causa 180 – Galho de Arvores (%)</i>	80.0
Percentual de ocorrência (%) <i>Causas 011 (Descarga Atmosférica) + 020 (Vento Forte)</i>	0.0
Percentual de ocorrência com menor incidência (%) <i>Causa 814 – Verificações</i>	20.0
Percentual de categoria com maior incidência (%) <i>Categoria Clima bom</i>	60.0
Percentual de ocorrência (%) <i>Categoria Cabo rompido</i>	20.0
Percentual de categoria com menor incidência (%) <i>Categoria Objeto estranho</i>	20.0

Tabela 5.6 – Cruzamento de informações oscilográficas – BIR1305.

Parâmetro	Valor
Registros de desligamentos processados	302
Registros de proteção (DJ e RL) processados	11359
Registros de ações processados	681
Registros de comentários processados	302
Número de oscilografias processadas	310
Número de oscilografias úteis para modelagem	51
Número de casos distintos encontrados	34
Número de casos envolvendo DJ	4
Número de casos envolvendo RL	30
Número de casos com referência direta de distância	8
Número de casos não relatados em base de dados	12
Percentual de faltas trifásicas (%)	17.64
Percentual de faltas monofásicas (%)	17.64
Percentual de faltas fase-fase (%)	23.52
Percentual de faltas de outro tipo ou não identificadas (%)	41.20
Percentual de ocorrência com maior incidência <i>Causa 180 – Galho de Arvores (%)</i>	17.64
Percentual de ocorrência (%) <i>Causas 011 (Descarga Atmosférica) + 020 (Vento Forte)</i>	2.94
Percentual de ocorrência com menor incidência (%) <i>Causa 890 – Causas não determinadas</i>	2.94
Percentual de categoria com maior incidência (%) <i>Categoria Clima bom</i>	32.35
Percentual de ocorrência (%) <i>Categoria Cabo rompido</i>	5.88
Percentual de categoria com menor incidência (%) <i>Categoria Poste podre</i>	2.94

Tabela 5.7 – Cruzamento de informações oscilográficas – MCI1305.

Parâmetro	Valor
Registros de desligamentos processados	363
Registros de proteção (DJ e RL) processados	15833
Registros de ações processados	351
Registros de comentários processados	364
Número de oscilografias processadas	1384
Número de oscilografias úteis para modelagem	244
Número de casos distintos encontrados	41
Número de casos envolvendo DJ	11
Número de casos envolvendo RL	30
Número de casos com referência direta de distância	5
Número de casos não relatados em base de dados	11
Percentual de faltas trifásicas (%)	26.82
Percentual de faltas monofásicas (%)	7.31
Percentual de faltas fase-fase (%)	14.63
Percentual de faltas de outro tipo ou não identificadas (%)	51.24
Percentual de ocorrência com maior incidência <i>Causa 180 – Galho de Arvores (%)</i>	29.26
Percentual de ocorrência (%) <i>Causas 011 (Descarga Atmosférica) + 020 (Vento Forte)</i>	9.75
Percentual de ocorrência com menor incidência (%) <i>Causa 321 – Abalroamento</i>	2.43
Percentual de categoria com maior incidência (%) <i>Categoria Clima bom</i>	24.39
Percentual de ocorrência (%) <i>Categoria Cabo rompido</i>	17.07
Percentual de categoria com menor incidência (%) <i>Categoria Isolador quebrado</i>	2.43

Foi possível constatar das tabelas apresentadas que a maior causa relatada em base de dados como responsável pelos desligamentos está associada com o contato de vegetação com a rede, sob ambiente de clima bom, sem presença de descargas atmosféricas ou ventos.

Cabe-se salientar também a grande diferença entre os alimentadores pilotos selecionados, principalmente à classificação de faltas, pois MCI1305 apresenta mais faltas trifásicas, já BIR1305 apresenta mais faltas fase-fase, ao passo que o JCE1312 apresenta mais faltas monofásicas. Finalmente, INP1306 apresenta um equilíbrio entre faltas trifásicas e fase-fase.

6. Considerações Finais e Continuidade do Trabalho

6.1 Conclusões gerais

Atualmente tem sido verificada junto ao setor elétrico brasileiro uma constante busca pela melhoria da qualidade dos serviços prestados. Para se atingir os índices de qualidade esperados, a detecção, classificação e localização de faltas em sistemas de energia elétrica constituíram-se em metas almejadas por diversos setores do sistema elétrico de potência.

A pesquisa bibliográfica realizada em bases técnico-científicas em busca de trabalhos que contemplem metodologias de detecção, classificação e localização de faltas em sistemas de distribuição mostra o empenho de pesquisadores de vários países, com proposições de trabalhos que fazem uso das mais distintas ferramentas, nas mais variadas conjunções.

O problema se mostra complexo e apresenta inúmeros desafios, principalmente quanto à generalidade da ferramenta a ser desenvolvida, frente às mais variadas situações de carga e faltas inerentes aos sistemas de distribuição.

As ferramentas inteligentes se destacam devido ao seu comprovado potencial de aplicação, complementando limitações de técnicas convencionais.

Fica evidente na pesquisa correlata que apenas a utilização de uma ferramenta inteligente não é capaz de suprir as necessidades de fenômenos faltosos nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Observa-se que abordagens empregando conjuntamente técnicas inteligentes e técnicas convencionais para tratamento de faltas têm obtido resultados expressivos aos processos envolvidos com a detecção de faltas.

A metodologia abordada neste trabalho utiliza ferramentas inteligentes e numéricas, integradas e sintonizadas entre si por um sistema automatizado, visando reunir as potencialidades individuais de cada uma delas num único sistema.

A arquitetura utilizada foi elaborada de maneira modular a fim de conferir um maior índice de redundância aos processos de identificação, classificação e localização de faltas, permitindo agregar novas tarefas em qualquer etapa do processo. Assim, a tecnologia proposta, com encadeamento das tarefas de identificação, classificação e localização da falta, confere uma maior robustez ao sistema como um todo e visa uma eficiência superior às demais técnicas.

Além de uma arquitetura modular e robusta sob o ponto de vista da ocorrência de falhas, o sistema inteligente para identificação de faltas foi implementado fazendo-se uso de ferramentas comprovadamente eficientes, dedicadas à realização do pré-processamento dos sinais de tensão e de corrente amostrados na subestação. Essas ferramentas operam somente sobre os referidos sinais de maneira a lhes extrair características que particularizem e diferenciem condições de faltas das demais condições normais de operação.

Assim, a eficiência dessas ferramentas de pré-processamento conferem ao sistema uma robustez e precisão tanto no que se refere à identificação de faltas, bem como para a determinação da fase participante da mesma e contribuindo com

informações para implementação de novas metodologias para a localização e setorização de faltas.

O processo de setorização de faltas, em virtude do número e da não linearidade das variáveis envolvidas, mostra ser complexo. A dinâmica não linear de um sistema elétrico, as simples e constantes variações de carga, de temperatura, de terreno e de tipo de falta, são capazes de influenciar na eficiência da abordagem desenvolvida. Uma forma de contornar tais limitações é incorporar ao sistema redundâncias de informações.

A principal contribuição desse trabalho foi focada na elaboração de uma nova metodologia destinada aos propósitos de localização e setorização de faltas em sistemas de distribuição.

A nova técnica para localização e setorização, baseada na análise espectral dos sinais e informações reais da rede, permite obter várias estimativas de local de falta por meio de múltiplas frequências, utilizando informações estatísticas como métricas para se quantificar a probabilidade da falta ter acontecido em um determinado local.

Uma vez desenvolvida essa nova técnica e integrada às técnicas inteligentes que já têm sido desenvolvidas, o sistema foi testado e validado em laboratório e em campo, contemplando quatro circuitos de distribuição.

Os resultados apresentados no Capítulo 5 mostram que o sistema desenvolvido tem a capacidade de identificar mais defeitos do que os observados pelos atuais sistemas de proteção instalados na concessionária, propondo sua provável localização.

Esta arquitetura modular e integrada para identificação, classificação, localização e setorização de faltas poderá auxiliar os operadores do sistema de

distribuição a tomarem decisões acertadas, contribuindo-se assim para a elevação dos índices de qualidade e, conseqüentemente, para o aumento do nível de satisfação de seus clientes.

6.2 Continuidades do trabalho

Como continuidade desse trabalho, seria interessante avaliar com maior profundidade os benefícios da indicação do provável lugar da falta nos indicadores da empresa, qual o reflexo dessa nova ferramenta nas atividades do COD e quais são seus impactos nos indicadores de qualidade.

Como foi verificada uma grande diferença entre os alimentadores piloto selecionados, outra proposta de continuidade seria estudar a confiabilidade dos resultados alcançados nesse trabalho com maior abrangência, em um estudo semelhante a um lote pioneiro, permitindo avaliar com maior profundidade seus benefícios para a qualidade do serviço em toda a cadeia.

Pelo aspecto modular do sistema desenvolvido, trabalhos futuros podem surgir para aprimorar a ferramenta, utilizando o conhecimento obtido em estudos anteriores e pela inserção de novas técnicas que possam surgir com o propósito de identificação e localização de faltas, e comunicação da mesma ao COD, o que também pode vir da implementação do sistema como um todo em relés de proteção, supervisão ou controle ou até em religadores que têm sido aplicados com maior frequência nas novas subestações em substituição aos tradicionais disjuntores e relés.

Referências Bibliográficas

- AKAIKE, H., "Fitting autoregressive models for prediction". *Annals Inst. Statist. Math.*, vol. 21, pp. 243-247, 1969.
- ANEEL, *PRODIST Módulo 8* (Estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica – QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado), 62 p., <http://www.aneel.gov.br>, 2009.
- BORGHETTI, A.; BOSETTI, M.; NUCCI, C.A.; PAOLONE, M., ABUR, A., "Integrated use of time-frequency wavelet decompositions for fault location in distribution networks: theory and experimental validation". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PP, n. 99, pp. 1-8, 2010.
- BRETAS, A.S.; MORETO, M.; SALIM, R.H., PIRES, L.O., "A novel high impedance fault location for distribution systems considering distributed generation". *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, pp. 1-6, 2006.
- BUTLER, K. L., MOMOH, J. A., "Robust features selection scheme for fault diagnosis in as electric power distribution system". *CCECE/CCGEI'93*, pp. 209-213, 1993.
- BUTLER, K.L., MOMOH, J.A., "A neural net based approach for fault diagnosis in distribution networks". *IEEE Power Eng. Society*, vol. 2, pp. 1275-1278, 2000.

- BUTLER, K.L., MOMOH, J.A., SOBAJIC, D.J., "Field studies using a neural-net-based approach for fault diagnosis in distribution networks". *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 5, pp. 429-436, 1997.
- CHAN, D.; WAI, T. and YIBIN, X., "A novel technique for high impedance fault identification". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 3, pp. 738-744, 1998.
- CHEN, W.H.; LIU, C.W., TSAI, M.S., "On-line fault diagnosis of distribution substations using hybrid cause-effect network and *fuzzy* rule-based method". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 710-717, 2000.
- CHO, N., HÁ, B., "The results of the field test in distribution automation system for the Korea Utility". *Proceedings of Power System Technology – POWERCON '98*, vol.1, pp. 48-52, 1998.
- CHOI, M.S., LEE, S.J., LEE, D.S., "A new fault location algorithm using direct circuit analysis for distribution systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 35-41, 2004.
- CHOI, T.; KOH, I.S; KIM, B.H.; SONG, W.S., JANG, W.S., "PC-based remote control and fault location system for distribution line". *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2, pp. 1085-1090, 1999.
- CHUNJU, F., HUARONG, C., WEIYONG, Y., "Application of six-sequence fault components in fault location for joint parallel transmission line". *Tsinghu Science and Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 247-253, 2005.
- CONG, D.P.; RAISON, B.; ROGNON, J.P.; BONNOIT, S., MANJAL, B., "Optimization of fault indicators placement with dispersed generation insertion". *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1530-1537, 2005.

- DAS, B., "Fuzzy Logic-Based Fault-Type Identification in Unbalanced Radial Power Distribution System" ", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 278-285, 2006.
- DEPEW, A.C., PARSICK, J.M., DEMPSEY, R.W., BENNER, C.L., RUSSELL, B.D., ADAMIAK, M.G., "Field experience with high-impedance fault detection relays". *59th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, vol. 1, pp. 1-6, 2006.
- DUGAN, R.C., MCGRANAGHAN, M.F., SANTOSO, S., BEATY H. W., "Electrical Power Systems Quality". Second Edition, New York: *McGraw Hill*, 2003. 528 p.
- EBRON, S., LUBKEMAN, D.L., WHITE, M., "A neural network approach to the detection of incipient faults on power distribution feeders". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 2, pp. 905-914, 1990.
- FARIA, J.A.B., "Application of Clarke's Transformation to the modal analysis of asymmetrical single-circuit three-phase line configuration". *ETEP European Transaction on Electrical Power*, vol. 10, pp. 225-231, 2000.
- FLAUZINO, R.A., *Identificação e Localização de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição Baseadas em Decomposição por Componentes Ortogonais e Inferência Fuzzy*, Tese de Doutorado, Universidade de São Carlos (USP), Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.
- FLAUZINO, R.A., Silva, I.N., "Uma abordagem baseada na técnica de decomposição em componentes ortogonais e sistemas de inferência fuzzy para localização de faltas de alta-impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica", *Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pp. 1-6, 2007.
- GAOUDA, A.M.; KANOUN, S.H.; SALAMA, M.M.A., CHIKHANI, A.Y., "Wavelet-based signal processing for disturbance classification and measurement". *IEE*

Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, vol. 149, no. 3, pp. 310-318, 2002.

GIRIGIS, A. A., FALLON, C. M., LUBKEMAN, D. L., "A fault location technique for rural distribution feeders", *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 29, no. 6, pp. 1170-1175, 1993.

IEEE C37.111. "IEEE Standard common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems." *The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 1999.

JARVENTAUSTA, P., VERHO, P., PARTANEN, J., "Using *fuzzy* sets to model the uncertainty in the fault location process of distribution networks". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 2, pp. 954-960, 1994.

JOTA, F.G., JOTA, P.R.S., "High-impedance fault identification using a *Fuzzy* reasoning system". *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 6, pp. 656-661, 1998.

KARIMI, M.; MOKHTARI, H., IRAVANI, M.R., "Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 4, pp. 1212-1220, 2000.

KO, J.H., "Detection of high impedance faults using neural nets and chaotic degree". *Proc. of Energy Management and Power Delivery*, vol. 2, pp. 399-404, 1998.

KO, J.H., SHIM, J.C., WAN RYU, C., PARK, G. and YIM, W.Y., "Detection of high impedance faults using neural nets and chaotic degree". *Proceedings of Energy Management and Power Delivery*, vol. 2, pp. 399-404, 1998.

LEE, S-J., CHOI, M-S., KANG, S-H., JIN, B-G., LEE, D-S., AHN, B-S., YOON, N-S., KIM, H-Y., WEE, S-B., "An intelligent and efficient fault location and diagnosis

- scheme for radial distribution systems". ", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 524-532, 2004.
- LEHTONEN, M.; MATSINEN, A.; ANTILA.; KURU, J., "An advanced model for automatic fault management in distribution networks". *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 3, pp. 1900-1904, 2000.
- LIU, W.H.E., ZHONG, W., "A Fuzzy set method for fault location identification in power distribution systems". *Proc. of 35th IEEE Conf. on Decision and Control*, vol. 2, pp. 2208-2212, 1996.
- LUO, S., KEZUNOVIC, M., SEVICK, D.R, "Locating faults in the transmission network using field measurements, simulation data and genetic algorithm". *Electric Power Systems Research*, vol. 71, pp. 169-177, 2004.
- MAGNAGO, F.H., ABUR, A., "A new fault location technique for radial distribution systems based on high frequency signals". *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pp. 426-431, 1999.
- MAHANTY, R.N., GUPTA, P.B.D., "Application of RBF neural network to fault classification and location in transmission lines". *IEE Proc. on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 151, no. 2, pp. 201-212, 2004.
- MAHMOOD, W.N, MUKERJEE, R.N., RAMACHANDARAMURTHY, V.K, "Fault point identification in a power network using single-point measurement". *IEEE TENCON Conference*, pp. 381-384, 2004.
- MARTINS, L.S., MARTINS, J.F., PIRES, F.V., ALEGRIA, C.M., "A neural space vector fault location for parallel double-circuit distribution lines". *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 27, 225-231, 2005.
- MARTINS, L.S.; MARTINS, J.F.; PIRES, V.F., ALEGRIA, C.M., "The application of neural networks and Clarke-Concordia transformation in fault location on

distribution power systems". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 2091-2095, 2002.

MARUSIC, A., GRUHONJIC-FERHATBEGOVIĆ, S., "A computerized fault location process for overhead radial distribution feeders". *2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference – MELECON 2006*, pp. 1114-1117, 2006.

MIRZAI, M.A., AFZALIAN, A.A., "A novel fault-locator system; algorithm, principle and practical implementation". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, n. 1, pp. 35-46, 2010.

MORA, J.J.; CARRILLO, G., PEREZ, L., "Fault location in power distribution systems using ANFIS nets and current patterns". *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, pp. 1-6, 2006.

MORA-FLOREZ, J.; ESTRADA-CARDONA, N., MORALES-ESPANA, G., "Single phase fault location in power distribution systems using statistical analysis". *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, pp. 1-5, 2008.

MOSHTAGH, J., AGGARWAL, R.K., "A new approach to fault location in a single core underground cable system using combined *Fuzzy* logic and wavelet analysis". *Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*, vol. 1 pp. 228-231, 2004.

ROBERTS, J. GUZMAN, A. SCHWEITZER, E.O., " $Z=V/I$ does not make a distance relay". *20th annual western protective relay conference*, 1993.

TAKAGI, T., YAMAKOSHI, Y., BABA, J., UEMURA, K., SAKAGUSHI, T., "A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: part I - fourier transformation method". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 3, 1316-1323, 1981.

- TAKAGI, T., YAMAKOSHI, Y., YAMAMURA, M., KONDOW, R., MATSUSHIMA, T.,
 "Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 8, pp. 2892-2898, 1982.
- TANG, Y., WANG, H.F., AGGARWAL, R.K., JOHNS, A.T., "Fault indicators in transmission and distribution systems", *Proceedings of Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 238-243, 2000.
- TANNLUND, P., BJORKMAN, G., "An advanced distribution automation system experience from application development and project implementation". *Proceedings of Power System Technology – PowerCon 2000*, vol.1, pp. 127-132, 2000.
- TOMSOVIC, K., BAKKEN, D.E., VENKATASUBRAMANIAN, V., BOSE, A.,
 "Designing the next generation of real-time control, communication, and computations for large power systems", *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 5, pp. 965-979, 2005.
- ULRYCH, T., BISHOP, T., "Maximum entropy spectral analysis and autoregressive". *Rev. Geophysics and Space Physic*, vol. 13, pp. 183-200, 1975.
- YAOZHONG, G., "New types of protective relaying and fault location – Theory and technique", *Xi'an Jiao Tong University Press*, 1996.
- YOUSSEF, O.A.S., "Applications of fuzzy-logic-wavelet-based techniques for transformers inrush currents identification and power system faults classification". *IEEE PES Power Systems Conf. and Exposition*, pp. 553-559, 2004.

- YOUSSEF, O.A.S., "Combined fuzzy-logic wavelet-based fault classification technique for power system relaying". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 582-589, 2004.
- ZABORZSKY, J., WHANG, K., PRASAD, K., "Fast contingency evaluation using concentric relaxation", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, no. 1, pp. 28-36, 1980.
- ZAHRA, F., JEYASURYA, B., QUAICOE, J.E., "High-speed transmission line relaying using artificial neural networks". *Electric Power Systems Research*, no. 53, pp. 173-179, 2000.
- ZHU ET AL. "Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 2, pp. 801-809, 1997.

Apêndices

Apêndice A - Código da função para Identificação dos segmentos de falta

===== Função *FindFaultsSegments* =====

```
% Determinação dos instantes de tempo com corrente superior ao limiar
faultSegments = [];
I = find(In >= inLimiar);

if ~isempty(I)
    % Definição de todos os segmentos ininterruptos
    J = [I(1) I(1)];
    for i = 2:length(I)
        if I(i) == J(end, 2) + 1
            J(end, 2) = I(i);
        else
            J = [J
                I(i) I(i)];
        end
    end
    % Agrupamento de segmentos com intervalo de tempo muito próximo
    K = J(1, :);
    for i = 2:size(J, 1)
        if J(i, 1) - K(end, 2) + 1 <= minCycles
            K(end, 2) = J(i, 2);
        else
            K = [K
                J(i, :)];
        end
    end
    % Exclusão dos segmentos com duração inferior ao número de amostras estabelecidos
    I = zeros(size(K, 1), 1);
    for i = 1:length(I)
        if K(i, 2) - K(i, 1) + 1 >= minCycles
            I(i) = 1;
        end
    end
    J = K(I == 1, :);
    for i = 1:size(J, 1)
        faultSegments(i).ind = J(i, 1):1:J(i, 2);
    end
else
    faultSegments = [];
end
end

=====Fim do Código =====
```

Apêndice B - Código da função para determinação da fase participante da falta

===== Função *FindFaultedPhase* =====

```
% definição dos angulos de comparação angular
tetaComp = exp(sqrt(-1)*[0 120 -120 60 180 -60]*pi/180);
for i = 1:length(faultSegments)
    tetaIOI2 = exp(sqrt(-1)*(angle(faultSegments(i).IO12(:, 1)) -
angle(faultSegments(i).IO12(:, 3))));
    d = abs(repmat(tetaIOI2, 1, size(tetaComp, 2)) - repmat(tetaComp,
size(tetaIOI2, 1), 1));
    [~, d] = min(d, [], 2);
    phase = zeros(1, 3);
    for j = 1:3
        phase(j) = sum(abs(faultSegments(i).IO12(d == j, 1)));
    end
    [~, phase] = max(phase);
    faultSegments(i).phase = phase;
    faultSegments(i).ind = faultSegments(i).ind(d == phase);
    faultSegments(i).time = faultSegments(i).time(d == phase);
    faultSegments(i).vabc = faultSegments(i).vabc(d == phase, :);
    faultSegments(i).iabc = faultSegments(i).iabc(d == phase, :);
    faultSegments(i).VABC = faultSegments(i).VABC(d == phase, :);
    faultSegments(i).IABC = faultSegments(i).IABC(d == phase, :);
    faultSegments(i).V012 = faultSegments(i).V012(d == phase, :);
    faultSegments(i).IO12 = faultSegments(i).IO12(d == phase, :);
end
faultSegmentsNew = faultSegments;
end
===== Fim do Código =====
```

Apêndice C - Código da função para análise de reatância e resistência de falta para cada segmento

===== Função *FaultLocation* =====

```
% Construção da matriz de impedâncias equivalente do sistema de distribuição
Z = zeros(length(systemMod.CCIRCUITO.nodesList), 3);
outMat = zeros(length(systemMod.CCIRCUITO.nodesList), 5);
for i = 1:size(Z, 1)
    Z(i, 1) = systemMod.CCIRCUITO.nodesList(i).Z0eq;
    Z(i, 2) = systemMod.CCIRCUITO.nodesList(i).Z1eq;
    Z(i, 3) = (Z(i, 1)/Z(i, 2) - 1)/3;
    outMat(i, 1) = real(systemMod.CCIRCUITO.buses(i));
    outMat(i, 2) = imag(systemMod.CCIRCUITO.buses(i));
    outMat(i, 3) = real(systemMod.CCIRCUITO.nodesList(i).dist);
end
% varredura de todos os segmentos de falta
for i = 1:length(faultSegments)
    % Calcula da corrente I a ser empregada nos cálculos. Esse cálculo leva
    % em consideração a fase sob falta
    Iph = faultSegments(i).IABC(:, faultSegments(i).phase);
    Vph = faultSegments(i).VABC(:, faultSegments(i).phase);
    % como em cada barra pode-se ter um fator ko diferente é necessário
    % especificar o alcance para cada nó
    X = zeros(size(Z, 1), 1);
    R = zeros(size(Z, 1), 1);
    for j = 1:size(Z, 1)
        % Cálculo da corrente a ser empregada na estimação do alcance
        I = Iph + 3*Z(j, 3)*faultSegments(i).I012(:, 1);
        r = imag(3*Vph.*conj(I))./imag(3*Z(j, 2)*I.*conj(faultSegments(i).I012(:, 1)));
        X(j) = sum(r.*abs(faultSegments(i).I012(:, 1)))/sum(abs(faultSegments(i).I012(:, 1)));
        Rf = imag(Vph.*conj(Z(j, 2).*I))./imag(1.5*(faultSegments(i).I012(:, 1) + faultSegments(i).I012(:, 3)).*conj(Z(j, 2).*I));
        R(j) = sum(Rf.*abs(faultSegments(i).I012(:, 1)))/sum(abs(faultSegments(i).I012(:, 1)));
    end
    outMat(:, 4) = X;
    outMat(:, 5) = R;
end
end
```

===== Fim do Código =====

Apêndice D - Código de conversão dos arquivos “.DAQ” para COMTRADE

A seguir encontra-se registrado o código que realiza a conversão dos arquivos “.DAQ”, provenientes da placa de aquisição de dados, para COMTRADE.

===== Início do Código =====

```
function [data, time, absTime] = daq2comtrade(fileName, stationName)
% Função para converter o arquivo "daq" especificado pelo string fileName
% para o formato COMTRADE.

% Leitura do arquivo DAQ
[data, time, absTime] = daqread(fileName);
data = data(:, 2:end);

% Especificação do nome de arquivo cfg
cfgFileName = [fileName(1:end - 3) 'cfg'];

% Criação do arquivo cfg
fid = fopen(cfgFileName, 'w');

% Escrita do cabeçalho do arquivo
fprintf(fid, '%s\r\n', [stationName ' ', SISFalta P&D EDP, 1999']);

% Especificação dos canais contidos no arquivo contrade
fprintf(fid, '%s\r\n', '6,6A,0D');

% Conversão dos canais para o formato contrade
A = zeros(size(data, 2), 1);
B = zeros(size(data, 2), 1);
mMax = 99999;
mMin = -99999;
dataNew = zeros(size(data));
for i = 1:length(A)
    % Determinação dos coeficientes de conversão
    A(i) = (max(data(:, i)) - min(data(:, i)))/(mMax - mMin);
    B(i) = min(data(:, i)) - mMin*A(i);
    % CONversão dos dados para escrita no arquivo DAT
    dataNew(:, i) = round((data(:, i) - B(i))/A(i));
end

% Escrita das informações dos canais analógicos
fprintf(fid, '%s\r\n', ['1, IA, , , A, ' sprintf('%0.5g', A(1)) ' ', '
sprintf('%0.5g', B(1)) ' ', 0, ' sprintf('%d', mMin) ' ', ' sprintf('%d', mMax) ' ', 1,
1, p']);
fprintf(fid, '%s\r\n', ['2, IB, , , A, ' sprintf('%0.5g', A(2)) ' ', '
sprintf('%0.5g', B(2)) ' ', 0, ' sprintf('%d', mMin) ' ', ' sprintf('%d', mMax) ' ', 1,
1, p']);
fprintf(fid, '%s\r\n', ['3, IC, , , A, ' sprintf('%0.5g', A(3)) ' ', '
sprintf('%0.5g', B(3)) ' ', 0, ' sprintf('%d', mMin) ' ', ' sprintf('%d', mMax) ' ', 1,
1, p']);
fprintf(fid, '%s\r\n', ['4, VA, , , V, ' sprintf('%0.5g', A(4)) ' ', '
sprintf('%0.5g', B(4)) ' ', 0, ' sprintf('%d', mMin) ' ', ' sprintf('%d', mMax) ' ', 1,
1, p']);
fprintf(fid, '%s\r\n', ['5, VB, , , V, ' sprintf('%0.5g', A(5)) ' ', '
sprintf('%0.5g', B(5)) ' ', 0, ' sprintf('%d', mMin) ' ', ' sprintf('%d', mMax) ' ', 1,
1, p']);
```



```

fprintf(fid, '%s\r\n', ['6, VC, , , V, ' sprintf('%0.5g', A(6)) ', '
sprintf('%0.5g', B(6)) ', 0, ' sprintf('%d', mMin) ', ' sprintf('%d', mMax) ', 1,
1, p']);

% Escrita da linha de frequencia
fprintf(fid, '%s\r\n', '60');

% Escrita que informa a quantidade de taxas de amostras presentes no
% arquivo DAT
fprintf(fid, '%s\r\n', '1');

% Escrita da linha que informa a frequencia amostral e a quantidade de
% amostras
f = mean(time(2:end) - time(1:end - 1));
f = 1/f;

fprintf(fid, '%s\r\n', [sprintf('%0.5g', f) ', ' sprintf('%d', size(dataNew, 1))]);

% Escrita da linha que informa a estampa de tempo absoluto
fprintf(fid, '%s\r\n', [datestr(absTime, 'dd/mm/yyyy,HH:MM:SS.FFF') '000']);
fprintf(fid, '%s\r\n', [datestr(absTime, 'dd/mm/yyyy,HH:MM:SS.FFF') '000']);

% Escrita da linha que informa o tipo de arquivo de dados
fprintf(fid, '%s\r\n', 'ASCII');
% Escrita da linha que informa o multiplicador da estampa de tempo
fprintf(fid, '%s\r\n', '1.0');

%termino de escrita do arquivo CFG
fclose(fid);

% Especificação do nome de arquivo dat
datFileName = [fileName(1:end - 3) 'dat'];

% Criação e abertura do arquivo dat
fid = fopen(datFileName, 'w');

% Escrita das linhas do arquivo DAT
for i = 1:size(dataNew, 1)
    s = sprintf('%d', dataNew(i, :));
    s = s(1:end - 1);
    fprintf(fid, '%s\r\n', s);
end

%termino de escrita do arquivo DAT
fclose(fid);

% Especificação do nome de arquivo HDR
hdrFileName = [fileName(1:end - 3) 'hdr'];

% Criação e abertura do arquivo hdr
fid = fopen(hdrFileName, 'w');

% termino de escrita do arquivo HDR
fclose(fid);

% Compactando os arquivos de oscilografia
zipFileName = ['REL_OSC_Q' stationName datestr(absTime, 'yyyymmddHHMMSSFFF')];
zip(zipFileName, {cfgFileName, datFileName, hdrFileName});
end

===== Fim do Código =====

```

Apêndice E - Sistema de Oscilografia

Para atender os requisitos do projeto piloto foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados de baixo custo, conforme ilustrado na figura a seguir:

Figura: Sistema de aquisição de dados

1. *Clamps* de corrente 10 A (medição de corrente)

- Garras de corrente: EB10/100 Embrasul
- Sensibilidade: 100 mV/A
- Secundário de TC - 5 A

2. Pontos de medição de tensão

- Secundário de TP 115 V
- Proteção: fusíveis

3. Condicionamento de sinais:

- 115 V → ~ 5V

4. Placa de aquisição de dados:

- *National Instruments* modelo USB 6211 (16 bits, 256 kS/s)
- Trigger: Software (Imediato) - Falta FT
- Entrada 0 : corrente de neutro

- Entrada 1, 2, 3: correntes de fase
- Entrada 4, 5, 6: tensões fase-neutro

5. PC:

- Software para registro dos eventos
- Software identificação de falta
- Software para localização da falta

6. Drivers

7. Software para controle da aquisição: Matlab

- Interface de controle: linha de comando
- Formato dos arquivos: .daq
- Visualização dos eventos: gráfica