UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO - SEL

RODRIGO ZEMPULSKI FANUCCHI

A Detecção e a Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição utilizando Transformadas *Wavelets* e Redes Neurais Artificiais

> São Carlos 2014

A Detecção e a Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição utilizando Transformadas *Wavelets* e Redes Neurais Artificiais

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, da Universidade de São Paulo - USP, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

São Carlos 2014 AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Fanucchi, Rodrigo Zempulski

A Detecção e Localização de Faltas de Alta
Impedância em Sistemas de Distribuição utilizando
Transformadas Wavelets e Redes Neurais Artificiais /
Rodrigo Zempulski Fanucchi; orientador Mário
Oleskovicz. São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado) - 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, 2014.
1. Sistemas Elétricos de Distribuição. 2. Sistemas de Proteção. 3. Faltas de Alta Impedância. 4. Detecção e Localização de Faltas. 5. Técnicas Inteligentes. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro RODRIGO ZEMPULSKI FANUCCHI.

Título da dissertação: A detecção e a localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição utilizando transformadas Wavelets e redes neurais artificiais".

Data da defesa: 01/09/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

orovado

ran

Prof. Dr. Mário Oleskovicz (Orientador) (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. David Calhau Jorge (Universidade Federal do Triangulo Mineiro/UFTM)

Prof. Dr. **Daniel Barbosa** (Universidade Salvador)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica: Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação: Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

À minha esposa Renata, por toda a paciência e apoio dado durante a elaboração deste trabalho, sempre estando presente nos momentos difíceis e comemorando junto às vitórias. Aos meus pais que sempre primaram pela minha educação e me incentivaram a buscar o meu aprimoramento.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha esposa Renata por todo o amor e carinho que me passa todos os dias. Pelo seu apoio incondicional durante todo o desenvolvimento deste trabalho, mesmo quando houve necessidade de "abrir mão" de algumas coisas para que fosse possível a realização do meu sonho. Espero poder retribuir sempre essa dedicação e apoio que tem demonstrado sempre por mim.

Agradeço aos meus pais, minha irmã e meu irmão por me apoiarem e sempre incentivarem a minha dedicação aos estudos, desde a minha infância até os dias de hoje. Sem vocês, nada disso seria possível.

Ao Professor Mário, pelas ideias, orientações e discussões durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ainda pelos conhecimentos repassados, ensinamentos e pela amizade criada. Ao Professor Daniel Barbosa que mesmo longe, sempre esteve disposto a ajudar e contribuir nas discussões realizadas.

Um agradecimento especial ao meu sogro, sogra, cunhado e cunhada que deram todo o suporte quando das minhas viagens para São Carlos.

Aos meus amigos Marcel e Camillo, por apoiarem e discutirem sempre as ideias referentes ao desenvolvimento desse trabalho. Além disso, por ajudarem a tornar horas de trabalho pesado e estressante em momentos mais leves e descontraídos, com a amizade e bom humor.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos os meus amigos em Londrina que me incentivaram nos últimos anos. Seria injusto nomear alguns e esquecer de outros, dessa forma, fica meu agradecimento a todos.

RESUMO

FANUCCHI, R. Z. A Detecção e a Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição utilizando Transformadas Wavelets e Redes Neurais Artificiais. 2014. 139f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

A ocorrência de faltas em sistemas elétricos de distribuição de energia é algo indesejável, porém, inerente ao mesmo devido a sua topologia normalmente aérea. Entre essas faltas, destacam-se as de alta impedância devido às características de corrente de baixa magnitude que surgem quando de sua ocorrência. No presente trabalho, um método baseado em três módulos é apresentado para a detecção e localização de faltas de alta impedância (FAI). No Módulo 1, é realizado um monitoramento contínuo dos sinais de corrente de forma a detectar a ocorrência de uma descontinuidade que pode estar vinculada a ocorrência de uma FAI. Caso haja essa detecção, o Módulo 2 é ativado de forma a analisar se o evento é realmente uma FAI. Por último, depois de detectada a FAI, o Módulo 3 é inicializado e a localização da falta, estimada. Para possibilitar a análise do método proposto e validar os resultados obtidos, um sistema de distribuição real, em conjunto com todas as etapas do sistema de aquisição de dados, foi modelado no software ATP/EMTP. Essa modelagem foi validada a partir de dados reais obtidos quando da ocorrência em campo de um curto-circuito bifásico. Vale ressaltar que um estudo de caso referente à importância da detecção e localização de um evento relacionado a uma FAI em uma concessionária de energia foi também analisado no início do trabalho de forma a mostrar o possível impacto da localização de FAIs nos indicadores de qualidade de serviço na mesma. Pelos resultados observados, a abordagem como um todo se mostra promissora e passível de aplicação no sistema real simulado e avaliado.

Palavras-chave: Sistemas elétricos de distribuição, sistemas de proteção, faltas de alta impedância, detecção e localização de faltas, técnicas inteligentes.

ABSTRACT

FANUCCHI, R. Z. Detection and Location of High Impedance Faults in Distribution Systems using Wavelets Transforms and Artificial Neural Networks. 2014. 139f. Dissertation (Master Degree) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

The occurrence of faults in overhead distribution networks is undesirable but common based on its topology. Among these events, High Impedance Faults (HIF) is one of the most important due to the fact that it has a small magnitude current. In this dissertation, a modular three-phase method is presented to enable HIF's detection and location in a distribution system. In the Module 1, the phase currents are monitored in order to detect a discontinuity that can be associated with a HIF's occurrence. If the Module 1 detected a discontinuity, the Module 2 is initiated and it analyses if the event can be classified as a HIF. Finally, if the Module 2 returns the event as a HIF, the Module 3 is initiated and the possible location of the HIF is estimated. To enable analysis of the proposed method and to validate the results, a real-based distribution system and the acquisition system of a digital relay were modeled in ATP/EMTP software. In order to validate the model, a simulated twophase fault were compared with the data obtained in a real event occurred in the analyzed distribution system. In order to present the importance of detecting and locating a HIF to a distribution utility, a case study was developed in the beginning of its work. Its importance is based on the improvement of the service quality indicators. Based on the results, the proposed method seems to be promising and applicable in a real distribution system.

Key-words: Electrical distribution systems, protection systems, high impedance faults, fault location.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas propostas para o desenvolvimento da pesquisa7
Figura 2 – Sistema de distribuição real simulado e em análise
Figura 3 – Perceptron multicamada com duas camadas escondidas (Fonte: SILVA et
al., 2010). 16
Figura 4 – Variáveis para análise de um PMC (Fonte: SILVA et al., 2010)18
Figura 5 - Região de separabilidade com dois neurônios (a), seis neurônios (b) e
quatro neurônios (c)
Figura 6 – PMC com o método one of c-classes com quatro classes de saída (Fonte:
SILVA et al., 2010)22
Figura 7 – Wavelet mãe symmlet em diversas localizações e diferentes escalas
(Fonte: DE OLIVEIRA; 2007)24
Figura 8 – Algumas formas de <i>wavelets</i> mãe. (Fonte: Barbosa (2010), adaptado de
Addison (2002))25
Figura 9 – Análise multirresolução de um sinal (Fonte: Adaptado de DE OLIVEIRA
(2007))
Figura 10 – Sistema elétrico com bancos de capacitores (Fonte: GREENWOOD,
1991)
Figura 11 - Transitórios observados nas formas de ondas da corrente e da tensão
na fase C quando do chaveamento de um banco de capacitores isolado (Fonte:
FERREIRA, 2010)
Figura 12 – Corrente de energização decorrente do chaveamento back-to-back
(Fonte: FERREIRA, 2010)
Figura 13 – Transitório de tensão na energização de um banco de capacitor com
outro já em operação (Fonte: GREENWOOD, 1991)35
Figura 14 – Curva de histerese na energização de um transformador (Fonte:
GREENWOOD, 1991)
Figura 15 – Caso de máxima corrente na energização de um transformador (Fonte:
Barbosa (2010), adaptado de Kulkarni e Khaparde (2005))
Figura 16 – Corrente diferencial de magnetização de um transformador qualquer.
(Fonte: Próprio Autor)
Figura 17 – Tensão e corrente de partida de um motor de indução (Fonte:

Figura 18 – Corrente de um forno a arco (Fonte: DECKMANN & POMILIO, 2010)41
Figura 19 – Espectro harmônico da corrente de um forno a arco (Fonte: DECKMANN
& POMILIO, 2010)41
Figura 20 - Detalhe da corrente caracterizada por uma falta de alta impedância
(Fonte: SULTAN, 1992)43
Figura 21 - Experimento realizado para a caracterização de arco elétrico em solo
arenoso (Fonte: Emanuel et al., 1990)44
Figura 22 – Modelo apresentado por Emanuel et al. (1990) para faltas de alta
impedância45
Figura 23 – Oscilografia de uma corrente de falta de alta impedância (Fonte:
NAKAGOMI, 2006)
Figura 24 – Nós de coeficientes de quarto nível (Fonte: LAZKANO et al., 2001)50
Figura 25 – Divisão por zonas do sinal reconstruído através dos coeficientes do nó
(Fonte: LAZKANO et al., 2001)50
Figura 26 - Coeficientes obtidos de um sinal de corrente quando da ocorrência de
uma FAI (Fonte: YANG et al., 2004)52
Figura 27 – Experimento para verificação de faltas de alta Impedância (Fonte:
ELKALASHY et al., 2007a)53
Figura 28 – Detalhes de terceira ordem nas correntes de fase quando da ocorrência
de uma FAI na fase A (Fonte: GARCIA & PAREDES, 2011)55
Figura 29 - Sistema de análise proposto por Takagi et al. (1982): a) sistema pré-
falta, b) sistema puramente faltoso e c) sistema sob falta
Figura 30 - Sistema de análise proposto por Lee et al. (2004) para uma falta fase-
terra (Fonte: FLAUZINO, 2007)65
Figura 31 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição em análise74
Figura 32 – Oscilografia da falta bifásica a 1,5 km da SE A83
Figura 33 – Correntes obtidas para uma falta bifásica a 1,5 km da SE A
Figura 34 – Tensões obtidas para uma falta bifásica a 1,5 km da SE A85
Figura 35 – Modelo para faltas de alta impedância86
Figura 36 – Curva VxI para utilização no modelo de faltas de alta impedância (Fonte:
NAKAGOMI, 2006)
Figura 37 – Corrente de uma falta de alta impedância de amplitude de 20 A87
Figura 38 – Detalhe da descontinuidade da corrente na passagem pelo eixo X88
Figura 39 – Modelo no ATP para um motor trifásico (Fonte: Adaptado de ZAPPELINI,

	09
Figura 40 – Torque do motor de 50 HP	91
Figura 41 – Torque do motor de 75 HP	91
Figura 42 – Frequência de rotação do motor de 50 HP.	91
Figura 43 – Frequência de rotação do motor de 75 HP.	92
Figura 44 – Corrente na fase A do motor de 50 HP.	92
Figura 45 - Modelo proposto para simulação de um forno a arco (Fonte: HO	RTON,
2009).	93
Figura 46 – Forno a arco modelado no ATP	93
Figura 47 – Correntes obtidas para o modelo do forno a arco	94
Figura 48 – Curva de saturação do transformador de corrente	95
Figura 49 – Modelo do transformador de corrente no ATP.	96
Figura 50 – Curva de saturação do transformador de potencial	97
Figura 51 – Modelo do transformador de potencial no ATP	97
Figura 52 – Fenômeno de aliasing (Fonte: BARBOSA, 2010)	99
Figura 53 – Sinal discretizado de corrente.	101
Figura 54 – Janela deslizante de um quarto de ciclo	105
Figura 55 – Energia do detalhe de terceira ordem do sinal de corrente sem eve	ento
	106
Figura 56 – Energia do detalhe de terceira ordem do sinal de corrente	
3	com a
ocorrência de FAI.	com a 107
ocorrência de FAI Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1	com a 107 108
ocorrência de FAI. Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1 Figura 58 – Representação da janela a ser considerada como entrada do Móde	com a 107 108 ulo 2
ocorrência de FAI. Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1 Figura 58 – Representação da janela a ser considerada como entrada do Módu	com a 107 108 ulo 2 111
ocorrência de FAI. Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1 Figura 58 – Representação da janela a ser considerada como entrada do Módu Figura 59 – Fluxograma proposto para o Módulo 2	com a 107 108 ulo 2 111 112
ocorrência de FAI. Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1 Figura 58 – Representação da janela a ser considerada como entrada do Módu Figura 59 – Fluxograma proposto para o Módulo 2 Figura 60 – Fluxograma proposto para o Módulo 3	com a 107 108 ulo 2 111 112 114
ocorrência de FAI. Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1. Figura 58 – Representação da janela a ser considerada como entrada do Módu Figura 59 – Fluxograma proposto para o Módulo 2. Figura 60 – Fluxograma proposto para o Módulo 3. Figura 61 – Representação da não detecção de sinal sem even	com a 107 108 ulo 2 111 112 114 to de
ocorrência de FAI. Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1. Figura 58 – Representação da janela a ser considerada como entrada do Módu Figura 59 – Fluxograma proposto para o Módulo 2. Figura 60 – Fluxograma proposto para o Módulo 3. Figura 61 – Representação da não detecção de sinal sem even descontinuidade.	com a 107 108 ulo 2 111 112 114 to de 121
ocorrência de FAI. Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1. Figura 58 – Representação da janela a ser considerada como entrada do Módu Figura 59 – Fluxograma proposto para o Módulo 2. Figura 60 – Fluxograma proposto para o Módulo 3. Figura 61 – Representação da não detecção de sinal sem even descontinuidade. Figura 62 – Evento relacionado a chaveamento de BCs.	com a 107 108 ulo 2 111 112 114 to de 121 122
ocorrência de FAI. Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1. Figura 58 – Representação da janela a ser considerada como entrada do Módu Figura 59 – Fluxograma proposto para o Módulo 2. Figura 60 – Fluxograma proposto para o Módulo 3. Figura 61 – Representação da não detecção de sinal sem even descontinuidade. Figura 62 – Evento relacionado a chaveamento de BCs. Figura 63 – Evento relacionado à partida de motores.	com a 107 108 ulo 2 111 112 114 to de 121 122 122
ocorrência de FAI. Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1 Figura 58 – Representação da janela a ser considerada como entrada do Módu Figura 59 – Fluxograma proposto para o Módulo 2 Figura 60 – Fluxograma proposto para o Módulo 3 Figura 61 – Representação da não detecção de sinal sem even descontinuidade. Figura 62 – Evento relacionado a chaveamento de BCs. Figura 63 – Evento relacionado à partida de motores. Figura 64 – Evento relacionado à operação de fornos a arco.	com a 107 108 ulo 2 111 112 114 to de 121 122 122 123
ocorrência de FAI. Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1 Figura 58 – Representação da janela a ser considerada como entrada do Módu Figura 59 – Fluxograma proposto para o Módulo 2 Figura 60 – Fluxograma proposto para o Módulo 3 Figura 61 – Representação da não detecção de sinal sem even descontinuidade. Figura 62 – Evento relacionado a chaveamento de BCs. Figura 63 – Evento relacionado à partida de motores. Figura 64 – Evento relacionado à operação de fornos a arco. Figura 65 – Evento relacionado à energização de transformadores.	com a 107 108 ulo 2 111 112 114 to de 121 122 122 123 123
ocorrência de FAI. Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1. Figura 58 – Representação da janela a ser considerada como entrada do Módu Figura 59 – Fluxograma proposto para o Módulo 2. Figura 60 – Fluxograma proposto para o Módulo 3. Figura 61 – Representação da não detecção de sinal sem even descontinuidade. Figura 62 – Evento relacionado a chaveamento de BCs. Figura 63 – Evento relacionado à partida de motores. Figura 64 – Evento relacionado à operação de fornos a arco. Figura 65 – Evento relacionado à energização de transformadores. Figura 66 – Evento relacionado a ocorrência de FAI.	com a 107 108 ulo 2 111 112 114 to de 121 122 122 123 123 124

Figura	68 – Erro	em percentual	da linha d	de cada	amostra c	lo Ensaio	2	130
Figura	69 – Erro	em percentual	da linha d	de cada	amostra d	lo Ensaio	3	131
Figura	70 – Erro	em percentual	da linha d	de cada	amostra d	lo Ensaio	4	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eventos ocorridos com tempo, duração, impacto e causa
Tabela 2 – Tempos estimados para atendimento com a localização estimada13
Tabela 3 - Valores típicos de correntes de faltas de alta impedância (AUCOIN et
al.,1989)
Tabela 4 – Correntes médias nos alimentadores.76
Tabela 5 – Impedâncias equivalentes do sistema de geração
Tabela 6 – Dados de placa do ensaio de curto-circuito do transformador da SE A76
Tabela 7 – Valores de impedância e reatâncias obtidos para o transformador da SE
A
Tabela 8 – Reatâncias do primário e secundário dos transformadores das SEs B e C.
Tabela 9 - Impedâncias e reatâncias de sequência zero e positiva para os
condutores 02-CA, 2/0-CAA e 4/0-CAA
Tabela 10 – Impedâncias e reatâncias de carga de cada alimentador
Tabela 11 – Capacitâncias para simulação dos bancos de capacitores
Tabela 12 – Correntes simuladas nos alimentadores do sistema modelado80
Tabela 13 – Correntes simuladas no ATP e ANAFAS para faltas trifásicas80
Tabela 14 – Correntes simuladas no ATP e ANAFAS para faltas bifásicas81
Tabela 15 – Correntes simuladas no ATP e ANAFAS para faltas monofásicas82
Tabela 16 - Correntes simuladas no ATP e no sistema da concessionária para os
alimentadores de 13,8 kV82
Tabela 17 – Grandezas verificadas na oscilografia do evento
Tabela 18 – Grandezas reais, simuladas e erro percentual
Tabela 19 – Dados do motor de indução trifásico de 50 HP (WEG, 2013)
Tabela 20 – Dados do motor de indução trifásico de 75 HP (WEG, 2013)90
Tabela 21 – Dados calculados dos motores de indução trifásicos90
Tabela 22 – Dados dos motores verificados na simulação
Tabela 23 – Curva de saturação do transformador de corrente95
Tabela 24 – Características do transformador de corrente.95
Tabela 25 – Curva de saturação do transformador de potencial
Tabela 26 – Características do transformador de potencial97
Tabela 27 – Eventos simulados sobre o sistema elétrico em análise

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMR	Análise Multiresolução
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
ATP	Alternative Transients Program
DEC	Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora
DIC	Duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por
	ponto de conexão
DMIC	Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora
	ou por ponto de conexão
EMTP	Eletromagnetic Transients Program
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
FAI	Faltas de Alta Impedância
FEC	Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora
FIC	Frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou
	por ponto de conexão
LDA	Linear Discriminant Analysis
PCA	Principle Component Analysis
PMC	Perceptron Multicamadas
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Setor Elétrico
	Nacional
RBF	Radial Basis Function
RNA	Redes Neurais Artificiais
SD	Sistema de Distribuição
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SF	Sistemas Fuzzy
SVM	Support Vector Machine
ТС	Transformador de Corrente
TF	Transformada de Fourier
TP	Transformador de Potencial
TRF	Transformada Rápida de Fourier
TW	Transformada Wavelet
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos da Pesquisa	3
1.2	Organização do Documento	4
2	Metodologia	7
2.1	Etapa 1 – Modelagem do Sistema de Distribuição Real e do Sistema	de
Aquisição	de Dados de um Relé de Proteção	7
2.2	Etapa 2 - Módulo de Determinação das Descontinuidades nos Sinals	9
2.3	Etapa 3 - Módulo de Detecção de Faltas de Alta Impedância	10
2.4	Etapa 4 - Módulo de Localização das Faltas de Alta Impedância	10
2.5	Considerações Finais	10
3	Estudo de Caso do Impacto de Eventos de Falta de Alta Impedância n	iOS
Indicadore	s de Qualidade de Serviço de uma Concessionária de Distribuição	11
3.1	Eventos em Setembro de 2010	11
4	Ferramentas de Interesse para a Pesquisa	15
4.1	Redes Neurais Artificiais (RNA)	15
4.1.1	O Perceptron Multicamadas (PMC)	16
4.1.1.1	O Algoritmo Error Backpropagation	17
4.1.2	O Perceptron Multicamadas em Problemas de Classificação de Padrõe	s
		20
4.2	Transformadas Wavelets	22
4.2.1	A Transformada Wavelet Contínua	25
4.2.2	A Transformada Wavelet Discreta	26
4.2.3	Análise Multirresolução (AMR)	27
5	Revisão Bibliográfica	29
5.1	Transitórios em Sistemas Elétricos de Potência	30
5.1.1	Chaveamento de Bancos de Capacitores	31
5.1.1.1	Chaveamento de um Banco de Capacitor Isolado	32
5.1.1.2	Chaveamento Back-to-Back de um Banco de Capacitor	34
5.1.2	Energização de Transformadores: Corrente de Magnetização	35
5.1.3	Partida de Motores	37
5.1.4	Fornos a Arco	40
5.1.5	Faltas de Alta Impedância (FAI)	40

5.1.5.1	Características das Faltas de Alta Impedância42				
5.2	Principais Trabalhos a Respeito da Detecção de FAI	46			
5.3	Localização de Faltas	58			
5.3.1	Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuiçã	ăo 68			
5.4	Comentários sobre a Revisão Bibliográfica	70			
6	Modelagem do Sistema de Distribuição: A Origem das Princ	ipais			
Situações	de Faltas de Alta Impedância e dos Transitórios em Análise	73			
6.1	O Sistema de Distribuição	73			
6.1.1	Modelagem do SD no ATP/EMTP	75			
6.1.2	Validação da Modelagem	78			
6.2	Modelagem das Faltas de Alta Impedância	85			
6.3	Modelagem dos Motores de Indução	88			
6.4	Modelagem do Forno a Arco	92			
6.5	Modelagem do Sistema de Aquisição de Dados	94			
6.5.1	Transformadores de Corrente (TC)	94			
6.5.2	Transformadores de Potencial (TP)	96			
6.5.3	Filtro Anti-Aliasing	98			
6.5.4	Sistema de Amostragem	100			
6.5.5	Conversor A/D	100			
7	Metodologia Proposta	103			
7.1	Módulo 1: Detecção da Descontinuidade do Sinal	104			
7.2	Módulo 2: Detecção de Faltas de Alta Impedância	109			
7.3	Módulo 3: Localização da Falta de Alta Impedância	113			
8	Simulações e Resultados Obtidos	115			
8.1	Simulações Realizadas para Análise do Método Proposto	115			
8.1.1	Simulações de Eventos Esperados do Sistema e FAIs na Área de 13	,8 kV			
		115			
8.1.2	Simulações de FAIs no Alimentador 1	120			
8.2	Módulo 1: Resultados Obtidos	120			
8.3	Módulo 2: Resultados Obtidos	124			
8.4	Módulo 3: Resultados Obtidos	127			
9	Considerações Finais	133			
Referência	as Bibliográficas	135			
Apêndice A	A – Sistema simulado e arquivo <i>.atp</i>	143			

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, uma grande expansão dos sistemas elétricos de potência (SEP) tem sido verificada em todo mundo. Essa expansão, vinculada principalmente a um aumento da atividade produtiva, trouxe novos desafios para a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Esses desafios estão relacionados principalmente com a capacidade de atendimento à demanda crescente de energia e com a continuidade do serviço prestado. Para ilustrar o crescimento da demanda, tem-se que somente na última década, a expansão do consumo no Brasil foi de 3,4% na média por ano (EPE, 2013).

No Brasil, atualmente, a continuidade dos serviços de energia elétrica é uma das principais preocupações das concessionárias. Isso se deve não apenas à energia não distribuída, mas também às exigências dos consumidores e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão regulador.

A ANEEL, tendo em vista a importância e necessidade de melhoria dos índices de continuidade das empresas do setor, publicou e vem constantemente revisando os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Setor Elétrico Nacional, o PRODIST (ANEEL, 2014). Neste documento, há a definição de indicadores de continuidade para grupos de consumidores (coletivos), como o FEC – frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora e DEC – duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, e para os individuais, como o DIC – duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, FIC – frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, dentre outros. A partir desses indicadores, são definidos alguns padrões mínimos da qualidade do serviço prestado pela concessionária, os quais, quando não cumpridos, acarretam o repasse de compensações financeiras aos consumidores através de descontos nas faturas (ANEEL, 2014). Dessa forma, além da perda de faturamento ocorrido pela energia não distribuída, a concessionária é penalizada com "descontos" na fatura do consumidor.

Tendo em vista estes apontamentos iniciais, ao longo dos últimos anos, as concessionárias têm investido fortemente em tecnologias e procedimentos focados na automação e melhor disponibilização e aproveitamento da informação, de maneira a tornar os sistemas, as redes, mais inteligentes, procurando assim denotar, aplicar e tirar proveito dos conceitos associados às redes inteligentes

(Smart Grids).

Contudo, apesar dos massivos e constantes investimentos realizados na automação, em boa parte das redes e na proteção digital dos sistemas elétricos, as redes elétricas de distribuição estão suscetíveis a alguns tipos de faltas, de difícil detecção, tendo em vista sua topologia normalmente aérea. Dentre essas faltas destacam-se as faltas de alta impedância (FAI) que produzem correntes de baixa amplitude, não sendo normalmente detectadas pelos dispositivos convencionais, relés e fusíveis, dos sistemas de proteção utilizados (BENNER & RUSSEL, 1997). Na ocorrência de uma FAI, há ainda a característica de intermitência da corrente de falta normalmente vinculada a presença de arco elétrico. Dessa forma, mesmo que em alguns momentos a amplitude da corrente seja maior que o ajuste da proteção associada, a mesma pode não durar tempo suficiente para sensibilizar, por exemplo, os ajustes de sobrecorrente existentes.

Cabe esclarecer que dentre as causas normalmente vinculadas às FAI, tem-se o rompimento de condutores vindo ao solo em pontos com alto valor de impedância e o contato de árvores ou galhos com cabos energizados (LAZKANO et al, 2000). Conforme AUCOIN *et al* (1996), estima-se que entre 33% a 50% das faltas de alta impedância estejam relacionadas a cabos energizados no solo. Esse tipo de situação, tendo em vista a característica de corrente de baixa amplitude, coloca em risco a segurança de pessoas que estejam próximas ao local devido a um possível contato com o condutor. Além disso, na ocorrência de uma FAI, tem-se normalmente a presença de arcos elétricos. Nestes casos, a energia dissipada pode ocasionar a evolução para uma falta permanente devido ao rompimento definitivo de um isolador, ou mesmo do condutor, quando a falta ocorre pelo contato de algum objeto com a rede energizada.

Outro aspecto importante relacionado à dificuldade de detecção de FAI refere-se as suas formas de onda, sendo que as características normalmente encontradas em uma primeira análise podem ser erroneamente interpretadas como situações normais do sistema, como chaveamentos de cargas e bancos de capacitores (YANG *et al.*, 2004).

Baseado nisso, a detecção de FAI e a localização das mesmas mostra-se como um importante aspecto vinculado à qualidade do serviço de uma concessionária, tendo em vista que a correção imediata do problema pode evitar desligamentos duradouros, bem como a uma questão de segurança da empresa, pois caso uma FAI relacionada à queda de um cabo energizado ao solo não seja detectada e localizada com rapidez, há o risco de acidente com pessoas.

Tendo em vista esse problema, ao longo das últimas décadas, a comunidade científica tem estudado mais profundamente a ocorrência das FAI. Inicialmente, os métodos propostos buscavam apenas a detecção deste tipo de falta. No entanto, nos últimos anos, a localização das mesmas em sistemas elétricos de potência tem mostrado evolução. Nos métodos de detecção propostos, alguns aspectos característicos das FAI têm sido utilizados, tais como: o comportamento randômico da corrente; a distorção da forma de onda (AUCOIN et al, 1989); os valores dos componentes harmônicos de segunda e terceira ordem; o espectro harmônico de baixa frequência (MOMOH et al., 1992); entre outros. Além disso, com a evolução das aplicações de técnicas de inteligência artificial, como, por exemplo, das redes neurais artificiais (RNA), e da Transformadas *Wavelets* (TW), características não facilmente verificadas por outros métodos, puderam ser obtidas para a correta detecção e localização da falta de alta impedância (LAZKANO et al., 2000; KEYIHANI et al., 2001; ETEMADI et al., 2008).

Baseado em todo o exposto nessa introdução, esta dissertação versará sobre a detecção e a localização de faltas de alta impedância (FAI) buscando não apenas a segurança de pessoas e instalações, mas também analisar o possível impacto desta localização nos índices relacionados à continuidade do fornecimento da energia elétrica e dos serviços prestados pelas concessionárias, tanto no que se referem à frequência dos desligamentos quanto no tempo total de atendimento ao consumidor.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

A detecção de faltas de alta impedância, conforme descrito anteriormente, mostra-se um como problema ainda em aberto na literatura e de grande preocupação para as concessionárias. Além disso, sua localização em sistemas de distribuição mostra-se ainda mais difícil devido à complexidade das malhas elétricas envolvidas.

Neste contexto, e tendo em vista a dificuldade de se obter dados de faltas de alta impedância em um sistema elétrico de potência, esta pesquisa tem como objetivo inicial modelar um sistema elétrico de distribuição, tendo como base um sistema real existente, de forma a utilizá-lo na validação da metodologia proposta para a detecção e a localização de faltas de alta impedância. A comparação de eventos de simulados de faltas e cargas desse modelo com dados fornecidos pela concessionária, bem como faltas ocorridas no sistema real e oscilografias darão o suporte inicial para a validação do mesmo, possibilitando comprovar a similaridade do modelo com o sistema físico. Além disso, através da análise das características de FAI, estas serão modeladas no mesmo sistema para obtenção dos dados a serem utilizados na validação do algoritmo.

Um aspecto importante a ser descrito posteriormente, refere-se ao fato de que o foco da detecção da FAI se dará no alimentador principal do sistema de distribuição devido a suas características construtivas e locais de passagem. Este é basicamente caracterizado por zonas rurais, e pela inexistência de consumidores ligados diretamente na seção do sistema em análise, o que dificulta o relato de consumidores na detecção e localização de FAI. As cargas alimentadas por este sistema estão ligadas a montante, sendo compostas por outras duas subestações com um total de cerca de 5.000 consumidores.

A partir da simulação de eventos no sistema elétrico de distribuição modelado, através da aplicação da Transformada *Wavelet* (TW), Transformadas Rápidas de Fourier (TRF) e de Redes Neurais Artificiais (RNA), o objetivo principal da pesquisa passa a ser o desenvolvimento de um algoritmo modular para a detecção de faltas de alta impedância, diferenciando-as das situações normais de operação do sistema elétrico (energização de transformadores, chaveamento de bancos de capacitores, entre outros), bem como a localização da mesma dentro do sistema elétrico de distribuição em análise. Vale ressaltar que esse algoritmo proposto visará à operação de maneira contínua, independente do sistema de proteção existente.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Esta dissertação de mestrado está organizada em oito capítulos de forma a melhor apresentar o assunto abordado. Neste primeiro capítulo, uma breve introdução do assunto é apresentada, assim como os objetivos do trabalho proposto.

No Capítulo 2, serão apresentadas as etapas realizadas durante a elaboração do trabalho. Uma descrição sucinta de cada etapa é indicada de forma a

possibilitar uma visão geral da pesquisa em questão.

No Capítulo 3 é apresentado um estudo de caso de forma a avaliar o impacto da detecção e localização de FAIs nos indicadores relacionados à qualidade de serviço de uma concessionária regional.

No Capítulo 4, são apresentadas as ferramentas e técnicas que foram utilizadas na elaboração do algoritmo e no desenvolvimento do trabalho. Essas ferramentas são apresentadas com a base teórica de sua utilização e aspectos técnicos de sua implementação.

De forma a subsidiar e respaldar a pesquisa realizada, no Capítulo 5 é apresentado uma revisão bibliográfica dos principais tópicos e pontos necessários para o entendimento e o desenvolvimento da mesma. São detalhadas as principais publicações encontradas até o momento e a contribuição de cada uma na área de pesquisa e no desenvolvimento da presente dissertação.

No Capítulo 6, é tratado do sistema elétrico de distribuição modelado e sua validação a partir da comparação dos eventos simulados com dados reais de carga e faltas obtidas através de eventos oscilografados. Neste capítulo é mostrada ainda a modelagem do sistema de aquisição de dados.

O Capítulo 7 apresenta o algoritmo modular proposto para a detecção e localização das FAIs.

No Capítulo 8 são apresentados os resultados obtidos para cada uma das etapas propostas tendo como entrada para a análise, os eventos simulados no sistema de distribuição modelado.

Por último, no Capítulo 9 são apresentadas as conclusões e discussões do presente trabalho.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram estabelecidas algumas etapas. Essas etapas são apresentadas na Figura 1 e, de maneira sucinta, são descritas a seguir.



Figura 1 – Etapas propostas para o desenvolvimento da pesquisa.

2.1 ETAPA 1 – MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO REAL E DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE UM RELÉ DE PROTEÇÃO

Nessa primeira etapa, um sistema de distribuição (SD) real de uma concessionária do sul do Brasil, apresentado de forma simplificada na Figura 2, foi modelado dispondo do *software* ATP (*Alternative Transients Program*) (BPA, 1987). De forma a facilitar essa modelagem, foi utilizada a interface gráfica do *software* ATPDraw (ATPDraw, 2012).

Vale adiantar que para a validação do SD, foram comparados os dados de corrente de cada alimentador do sistema modelado com os valores médios do sistema real em regime permanente. Além disso, dados de faltas simuladas no modelo proposto, obtidos em diversos pontos de cada alimentador, tiveram suas amplitudes comparadas com os valores simulados nos *softwares* utilizados pela concessionária.

Ainda, para comprovar a acurácia da modelagem, os resultados simulados foram comparados com dados oscilografados de uma falta real ocorrida em um ponto conhecido de um dos alimentadores do SD em análise.



Figura 2 – Sistema de distribuição real simulado e em análise.

Inicialmente nessa etapa, o sistema de aquisição de dados foi modelado tendo em vista a topologia típica de um relé de proteção digital. Cabe adiantar e enfatizar que essa modelagem foi realizada totalmente via o *software* ATP/EMTP, através da interface gráfica fornecida pelo ATP*Draw*, de forma a validar toda a análise de maneira unificada, não necessitando de outras implementações, ou interfaces, para as etapas de aquisição e pré-processamento dos dados. Nessa etapa foram definidos ainda os aspecto do relé de proteção relacionados à taxa de amostragem dos sinais, número de *bits* do conversor A/D e filtro *Butterworth*.

Ainda nessa etapa do trabalho foram simulados vários eventos no sistema elétrico modelado. Esses eventos contemplaram situações normais de operação do sistema, como chaveamentos de bancos de capacitores, energização de transformadores, partidas de motores, à operação de fornos a arco e faltas de alta impedância com a presença de arco elétrico. Além disso, dados que refletem a pré-ocorrência dos eventos foram utilizados tendo em vista o módulo proposto de detecção das descontinuidades das formas de ondas dos sinais elétricos em análise.

Como anteriormente apresentado, o foco da detecção de faltas de

alta impedância dar-se-á no alimentador AI. 1 (Figura 2), devido as suas características sucintamente descritas no capítulo anterior no item 1.1. Sendo assim, as simulações dos transitórios serão realizadas nos demais alimentadores e subestações, tanto de 13,8 kV quanto de 34,5 kV, de forma a possibilitar ao algoritmo a diferenciação entre os eventos de operação normal do sistema elétrico e de situações de faltas de alta impedância no alimentador AI. 1.

Vale ressaltar ainda que, de forma a verificar a eficácia do método proposto com relação à detecção de FAIs na área de 13,8 kV dos alimentadores a jusante das SEs 2 e 3, foram simuladas ocorrências das mesmas nos referidos circuitos.

Informações detalhadas de toda aquisição e pré-processamento dos dados, considerando a modelagem e as simulações computacionais realizadas serão posteriormente apresentadas no capítulo 5 deste documento.

2.2 ETAPA 2 - MÓDULO DE DETERMINAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES NOS SINAIS

Através da análise de eventos reais, tem-se que para faltas de alta impedância, normalmente, há a existência de descontinuidades nas formas de ondas dos sinais nas proximidades da passagem dos valores das correntes por zero. Isso se deve ao fato de que, quando da passagem por zero, ocorre a extinção e a re-ignição do arco elétrico. Ou seja, após o rompimento do dielétrico há novamente o aparecimento de corrente fluindo em direção a terra. Essa situação acarreta a ocorrência de variações de energia em determinadas bandas de energia extraídas através de Transformadas *Wavelets*.

Baseado nisso, durante a elaboração desse módulo foram analisadas as variações de energia que aparecem quando da ocorrência de uma descontinuidade, normalmente relacionada a algum evento no sistema elétrico, nos coeficientes dos detalhes, obtidos através de uma Transformada *Wavelet*, dos sinais de corrente. Além disso, buscou-se nessa etapa, além de monitoramento contínuo, que o passo da janela deslizante nos sinais de corrente de fase fosse no máximo de um quarto de ciclo.

2.3 ETAPA 3 - MÓDULO DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Esse módulo tem como objetivo, após a detecção de uma situação anormal do sistema, caracterizar se a mesma é uma FAI ou não. Para isso, as características principais das FAIs e dos eventos simulados foram mais bem explorados de forma a abstrair aspectos (características e/ou padrões) que possibilitem diferenciá-los.

Para isso, dispôs-se nessa etapa de uma arquitetura de uma rede neural artificial (RNA) e, a partir da determinação de características da FAI, determinar se o evento é efetivamente uma FAI ou não. Um aspecto inicialmente estudado refere-se ao conteúdo harmônico das FAIs. Além disso, devido ao objetivo ainda de diferenciar as FAIs na área de 34,5 kV e 13,8 kV, a corrente de sequência zero mostrou-se de extrema importância para o desenvolvimento do trabalho.

2.4 ETAPA 4 - MÓDULO DE LOCALIZAÇÃO DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

A detecção simples de uma falta de alta impedância em um sistema de distribuição significa apenas uma parte do problema resolvido, tendo em vista a necessidade de uma localização rápida e precisa da mesma, reduzindo ou mitigando qualquer impacto nos índices de continuidade do fornecimento da energia e de segurança das pessoas. Sendo assim, esta pesquisa propôs ainda o desenvolvimento de um módulo de localização do local de ocorrência da falta após a detecção da mesma pelo módulo descrito anteriormente.

Para essa localização, foram estudadas características obtidas através dos sinais de corrente e da tensão das fases utilizando-se de topologias de RNAs. Através das localizações estimadas, foram comparadas as topologias em termos do erro percentual da extensão total da linha de distribuição em análise.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse capítulo buscou apresentar uma visão geral das etapas realizadas para o desenvolvimento do referido trabalho. Uma melhor descrição de todas as etapas será apresentada nos capítulos 6, 7 e 8.

3 ESTUDO DE CASO DO IMPACTO DE EVENTOS DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA NOS INDICADORES DE QUALIDADE DE SERVIÇO DE UMA CONCESSIONÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO

Como já descrito anteriormente, o alimentador 1, que é o objeto principal de estudo nesse trabalho, atende duas subestações de 34,5/13,8 kV atendendo cerca de 5.000 consumidores. Dessa forma, visando avaliar como uma correta detecção do local da FAI pode impactar positivamente na melhora dos índices de continuidade da concessionária ou mesmo evitar totalmente os mesmos, quando há a localização do local da FAI durante a ocorrência de eventos intermitentes, um caso ocorrido no alimentador 1 será analisado.

3.1 EVENTOS EM SETEMBRO DE 2010

Na primeira semana de setembro de 2010 houve três atuações do religador que protege o alimentador 1 em questão. Essas atuações, com data, horário, duração e causa identificada são mostradas na Tabela 1.

Analisando essas interrupções, é possível verificar que para o cálculo do FEC e do DEC, o evento do dia 03 de setembro não é considerado tendo em vista a duração ser menor que três minutos. Já para os eventos do dia 07 de setembro, os dois são maiores que três minutos, sendo, portanto, considerados para o cálculo do FEC e do DEC. Em linhas gerais, pode-se entender que houve uma primeira falta momentânea no dia 03 que não foi investigada. Após isso, na primeira interrupção do dia 07, o alimentador foi inspecionado e nada foi encontrado, sendo religado. Ocorreu, então, novo desligamento no dia 07, sendo que nesse evento foi então identificado o local onde havia uma pipa no condutor, "fechando curto" com a cruzeta a cerca de seis quilômetros da subestação. Após a retirada da mesma, os desligamentos cessaram. Esses eventos contabilizaram 11.512 consumidores interrompidos (total das duas interrupções) e 13.647 consumidores x horas.

Data	Horário de Início	Duração (hora:minutos)	Consumidores	Consumidores x Horas	Causa
03/09/2010	11:51	00:01	5.256	0	Não Identificada
07/09/2010	01:24	02:14	5.256	11.720	Não Identificada
07/09/2010	07:11	00:22	5.256	1.927	Pipa próxima a isolador

Tabela 1 – Eventos ocorridos com tempo, duração, impacto e causa.

Essa causa encontrada indica uma possível característica de FAI tendo em vista a impedância inserida e a intermitência mostrada quando da ocorrência da falta momentânea do dia 03 de setembro. Dessa forma, entende-se que com o monitoramento inserido pelo algoritmo proposto nesse trabalho, haveria duas possibilidades:

- 1) Detecção e localização da FAI no evento do dia 03 de setembro;
- Detecção e localização da FAI no primeiro evento do dia 07 de setembro.

Na primeira situação, o direcionamento de uma equipe de atuação com a linha ligada, conhecida como equipe de linha viva, poderia ter realizado a retirada da pipa sem o desligamento da mesma. Dessa forma, os outros dois eventos que geraram a contabilização de DEC e FEC seriam evitados. Isso significa dizer que a quantidade de consumidores interrompidos seria de zero e a quantidade de consumidores x horas de zero também.

Na segunda situação, estimou-se o tempo de acionamento da equipe de sobreaviso ($t_{acionamento}$), o tempo para deslocamento ao local indicado ($t_{deslocamento}$), o tempo para percorrer o trecho tendo em vista o erro percentual médio do Módulo 3 ($t_{localização}$), e o tempo para execução da retirada da pipa ($t_{execução}$). Esses tempos são mostrados na Tabela 2 juntamente com o tempo total estimado (t_{total}).
Descrição	Duração
	(horas: minutos)
t _{acionamento}	00:30
t _{deslocamento}	00:13
t _{localização}	00:05
t _{execução}	00:20
t _{total}	01:08

Tabela 2 – Tempos estimados para atendimento com a localização estimada.

Considerando então esses valores estimados, a quantidade de consumidores interrompidos seria reduzida em 50%, ou seja, 5.256, tendo em vista a não ocorrência do segundo evento do dia 07 de setembro. Com relação à quantidade de consumidores x horas, o valor seria então de 5.956,8, caracterizando uma redução de 56,65%.

Dessa forma, pode-se verificar que a localização de FAIs torna-se importante não apenas no requisito relacionado à segurança de pessoas, mas também no aspecto inerente a qualidade de serviço da concessionária.

4 FERRAMENTAS DE INTERESSE PARA A PESQUISA

Nesse capítulo será feita uma fundamentação teórica das principais características das duas principais ferramentas que se pretende utilizar na resolução do problema proposto: Redes Neurais Artificiais, com foco principal no *perceptron* multicamadas (PMC), e as Transformadas *Wavelets* (TW), com foco principal na análise multiresolução.

4.1 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA)

O cérebro possui habilidades e forma de processamento que possibilitam a interação do ser humano com o meio ambiente. Isso se deve a capacidade do mesmo trabalhar as informações de forma rápida, não linear e paralela (HAYKIN, 1999). Em conjunto com isso, há ainda a capacidade do cérebro de aprendizagem em função das experiências passadas pelo mesmo, isso permite a resposta à determinada situação, através da generalização de um evento já ocorrido.

Tendo estes comentários iniciais como base, a estrutura de uma RNA tem como principal inspiração a forma de aprendizagem do cérebro humano e busca a resolução de problemas de forma análoga ao mesmo.

Entre suas principais características, pode-se citar:

- Adaptação por experiência;
- Capacidade de aprendizado;
- Habilidade de generalização;
- Organização de dados;
- Tolerância às falhas;
- Armazenamento distribuído;
- Facilidade de prototipagem.

Dessa forma, é possível utilizar as redes neurais artificiais para a resolução de problemas como:

- Aproximação de funções;
- Classificação de padrões;
- Controle de processos;
- Otimização de sistemas;

Memórias associativas.

4.1.1 O Perceptron Multicamadas (PMC)

As redes neurais do tipo PMC caracterizam-se pela presença de pelo menos uma camada escondida de neurônios. O sinal, após ser inserido na camada de entrada, é propagado camada após camada até atingir a saída do mesmo, sendo que as camadas intermediárias são de extrema importância para a extração e codificação das informações por meio de seus pesos sinápticos. Na Figura 3 é mostrado um exemplo de um PMC com duas camadas escondidas (SILVA et al, 2010). Pode-se verificar que não há nenhum caminho de realimentação nesse tipo de rede, e a saída da camada anterior é a entrada da subsequente.



Figura 3 – Perceptron multicamada com duas camadas escondidas (Fonte: SILVA et al., 2010).

A principal característica do PMC refere-se a sua forma de aprendizagem que ocorre de maneira supervisionada com um algoritmo conhecido como *error backpropagation*. Esse algoritmo, tendo como foco a correção do erro, possui uma primeira etapa onde a resposta do mesmo com os pesos sinápticos atuais é obtida. Com esse resultado, o erro entre este e o resultado desejado é verificado. Na segunda etapa, este erro é utilizado e propagado no sentido inverso da RNA corrigindo os pesos sinápticos da mesma.

Com relação à quantidade de neurônios e camadas intermediárias,

há uma dependência com o tipo de problema e precisão necessários para a análise, assim como das amostras utilizadas para o treinamento do mesmo.

Outro aspecto importante é referente à função de ativação dos neurônios utilizados em um PMC. Esta deve ser não linear e diferenciável em toda sua extensão. A equação 1 indica a função logística normalmente utilizada para ativação neste tipo de rede neural.

$$y_j = \frac{1}{1 + \exp(-\nu_j)} \tag{1}$$

4.1.1.1 O Algoritmo Error Backpropagation

O treinamento de uma rede PMC utiliza-se do algoritmo conhecido como error backpropagation ou apenas backpropagation. Esse método é composto por duas fases, sendo a primeira conhecida como forward, e a segunda como backward. Conforme já descrito anteriormente, a primeira fase visa tão somente, utilizando amostras do conjunto de treinamento, obter a resposta da rede em questão. Já a segunda etapa, tendo calculado o erro existente entre a resposta do sistema e o esperado, propaga-se o erro no sentido reverso fazendo a correção dos valores dos pesos sinápticos e limiares dos neurônios.

Para um melhor entendimento do algoritmo, tem-se na Figura 4 uma rede neural composta de duas camadas escondidas. Nessa rede PMC tem-se as seguintes variáveis (SILVA et al., 2010):

- W_{ji}^(L) são as matrizes de peso sináptico entre o *j*-ésimo neurônio da camada L e o *i*-ésimo neurônio da camada L-1;
- *I*^(L) são os vetores de entrada do *j*-ésimo neurônio da camada *L* com o valor já ponderado pelos pesos sinápticos em relação a este. De forma matemática, tem-se a equação 2 para ilustrar o descrito.

$$I_{j}^{(L)} = \sum_{i=0}^{n} W_{ji}^{(L)} \cdot x_{i}$$
⁽²⁾

 Y_j^(L) são os vetores que denotam os valores de saída do jésimo neurônio da camada L obtidos através da utilização da função de ativação considerada.



Figura 4 – Variáveis para análise de um PMC (Fonte: SILVA et al., 2010).

Com a obtenção desses parâmetros pode-se passar para o próximo passo referente à verificação do erro existente entre a resposta obtida e a esperada. Esse desvio existente é obtido através da avaliação global do erro quadrático médio em relação ao conjunto de amostras de treinamento utilizado, conforme mostrado na equação a seguir.

$$E_{M} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^{p} E(k)$$
(3)

Nessa equação, o valor *p* denota a quantidade de amostras utilizadas no conjunto de treinamento. Para a avaliação do erro de cada amostra deve-se utilizar a equação a seguir.

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n} (d_j(k) - Y_j^{(L)}(k))^2$$
⁽⁴⁾

Sendo que o valor de *n* indica a quantidade de neurônios na camada de saída e d_i o valor esperado de saída de cada neurônio.

Após essa etapa, pode-se realizar o ajuste dos pesos sinápticos e limiares de cada camada de neurônio da rede neural. Esse ajuste visa em ajustar a matriz $W_{ji}^{(L)}$ de cada camada de forma a minimizar o erro quadrático médio até valores aceitáveis. Primeiramente, para a camada de saída deve-se obter o gradiente local em relação ao *j*-ésimo neurônio da mesma. Esse valor pode ser obtido conforme segue.

$$\delta_{j}^{(L)} = \left(d_{j} - Y_{j}^{(L)}\right) g^{'}(I_{j}^{(L)})$$
(5)

Nessa equação, d_j indica o valor desejado de saída do *j*-ésimo neurônio da camada de saída, $Y_j^{(L)}$ indica a saída obtida no mesmo, e g(.) a derivada de primeira ordem da função de ativação.

Com a obtenção dos valores dos gradientes locais, pode-se então realizar o ajuste dos pesos sinápticos da camada de saída conforme a seguir.

$$W_{ji}^{(L)}(t+1) = W_{ji}^{(L)}(t) + \eta \, \delta_j^{(L)} \, Y_i^{(L-1)} \tag{6}$$

Para as camadas escondidas, a forma de ajuste é um pouco diferente, tendo em vista o fato de não haver disponível os valores desejados das camadas intermediárias. Dessa forma, o algoritmo *backpropagation* tem sua essência justamente no aspecto de considerar para o ajuste da matriz de pesos sinápticos das camadas escondidas, os valores ponderados da matriz já ajustada da camada de saída (SILVA et al., 2010).

Com essas considerações, tem-se então pela equação 7 a forma de obtenção do gradiente local da camada escondida.

$$\delta_{j}^{(L)} = \left(\sum_{k=1}^{n_{L+1}} \delta_{k}^{(L+1)} . W_{kj}^{(L+1)}\right) . g^{`}(l_{j}^{(L)})$$
⁽⁷⁾

Verifica-se que os valores da camada adiante são necessários para o cálculo do gradiente da camada em análise.

Com a determinação do gradiente local, pode-se então realizar o ajuste da matriz de pesos sinápticos da camada escondida em análise através da equação 8. No entanto, é importante ressaltar que quando a camada em análise for a primeira escondida, o ajuste da matriz de pesos sinápticos deverá ser feito através da equação 8, onde x_i indica os valores de entrada da rede neural.

$$W_{ji}^{(1)}(t+1) = W_{ji}^{(1)}(t) + \eta \cdot \delta_j^{(1)} \cdot x_i$$
(8)

4.1.2 O Perceptron Multicamadas em Problemas de Classificação de Padrões

Um problema de classificação de padrões refere-se a associar as entradas de um sistema a um dos padrões anteriormente definidos. Estas classes são normalmente vinculadas às características discretas que podem ser enumeradas de forma a indicar a presença ou ausência destas.

Em um PMC, cada neurônio da camada escondida possui uma reta de separabilidade na região de definição do problema. Dessa forma, um PMC com uma camada escondida permite o mapeamento de um problema de classificação de padrões em uma região convexa (SILVA et al., 2010). Na Figura 5, são mostrados exemplos de classificação de amostras utilizando dois, seis e quatro neurônios na camada escondida (SILVA et al., 2010). Já para a classificação de padrões existentes em que qualquer tipo de região geométrica, inclusive não convexas, fazse necessária a utilização de uma rede neural PMC com duas camadas escondidas.

20



Figura 5 – Região de separabilidade com dois neurônios (a), seis neurônios (b) e quatro neurônios (c).

Os neurônios da camada de saída do PMC tem como função neste tipo de problema, realizar a combinação lógica das camadas anteriores através de operações do tipo AND e OR. Dessa forma, obtém-se o mapeamento total da resposta obtida pela rede associada.

Para a utilização de um PMC para classificação de padrões quando da existência de mais de duas classes, é necessária a inclusão de mais neurônios na camada de saída. De forma básica, a quantidade de classes possíveis de distinção por um PMC é dada por 2^m , onde *m* é a quantidade de neurônios da camada de saída.

Existe ainda outro método para classificação de padrões quando da necessidade de distinção entre mais de duas classes conhecido como *one of c-classes*. Nesse caso, cada neurônio da camada de saída é vinculado diretamente a uma classe definida. Isso significa dizer que, um PMC com quatro neurônios na camada de saída irá mapear quatro classes. Na Figura 6 é ilustrado um exemplo de PMC utilizando o método descrito para mapeamento de quatro classes.

Um aspecto final importante está relacionado ao pós-processamento dos valores dos neurônios da camada de saída. Estes valores têm como princípio indicar se as entradas estão associadas à determinada classe, ou não, de forma binária, ou seja, "0" ou "1". No entanto, devido às funções de ativação normalmente utilizadas, esses valores estão normalmente próximos de "0" ou "1". Dessa forma, deve-se utilizar a sistemática mostrada na equação 9 de forma a se obter os valores de saída pós-processados a partir de limiares superiores e inferiores. Importante ainda ressaltar que estes valores dependem da precisão requerida. No caso da função logística, os valores típicos são $lim^{sup} \in [0,5;0,9]$ e $lim^{inf} \in [0,1;0,5]$ (SILVA et al., 2010).



Figura 6 – PMC com o método *one of c-classes* com quatro classes de saída (Fonte: SILVA et al., 2010).

$$y_j^{pós} = \begin{cases} 1, & se \ y_j^{saida} \ge lim^{sup} \\ 0, & se \ y_j^{saida} \le lim^{inf} \end{cases}$$
(9)

4.2 TRANSFORMADAS WAVELETS

A Transformada *Wavelet* (TW) tem sido amplamente pesquisada e discutida nos últimos anos devido a suas características possibilitarem a extração de aspectos locais do sinal analisado. Isso significa dizer que é possível realizar uma análise espectral de determinado ponto do sinal não estacionário, diferentemente de outras técnicas utilizadas como, por exemplo, a Transformada de Fourier (TF) que considera todo o período de existência do mesmo (DE OLIVEIRA, 2007). Dessa forma, aspectos relacionados à frequência de um sinal podem ser extraídos com sua localização no tempo, possibilitando um melhor conhecimento do evento analisado.

Essa poderosa ferramenta foi introduzida em um trabalho pioneiro focado na análise de características de ondas acústicas sísmicas, realizado pelo engenheiro francês *Jean Morlet*. Nesse trabalho é apresentado o conceito de *wavelet* mãe, da qual outras funções são derivadas a partir de dilatações e translações da mesma (BARBOSA, 2010).

Essas funções são o ponto crucial deste tipo de análise. De forma geral, estas funções são definidas matematicamente da seguinte forma:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{10}$$

Nessa equação, tem-se que *a* indica o aspecto conhecido como escala, ou seja, o grau de compressão da mesma, e *b* indica o deslocamento da mesma no tempo ou translação. Dessa forma, alguns aspectos relacionados a estes parâmetros podem ser observados (BARBOSA, 2010):

- |a| < 1: a wavelet está comprimida em relação a sua wavelet mãe.
- |a| > 1: a wavelet está dilatada em relação a sua wavelet mãe.

Dessa forma, com a *wavelet* comprimida há um maior detalhamento das altas frequências, enquanto que a dilatação da mesma possibilita uma melhor análise das frequências mais baixas. Já com relação ao parâmetro *b*, sua variação permite uma análise do sinal em vários momentos distintos. Sendo assim, com o conjunto dos dois parâmetros, é possível analisar o sinal tanto no tempo quanto em frequência. Na Figura 7 é possível verificar a *wavelet* mãe *Symmlet* em diversas localizações e escalas.



Figura 7 – Wavelet mãe symmlet em diversas localizações e diferentes escalas (Fonte: DE OLIVEIRA; 2007).

Existem atualmente mapeadas diversas funções consideradas como *wavelets* mãe. Para que isso ocorra, algumas condições matemáticas devem ser respeitadas (BARBOSA, 2010):

- Ser absolutamente integrável;
- Possuir qualquer nível de energia, desde que seja finita e preservada pela análise;
- Respeitar a condição de admissibilidade conforme a equação (11);

$$C_g = \int_0^\infty \frac{|\Psi(F)|^2}{f} df < \infty$$
⁽¹¹⁾

Não possuir frequências negativas quando a *wavelet* for complexa.

Entre as diversas famílias existentes, destacam-se a Haar, Morlet, Symlet, Daubechies, entre outras. A Figura 8 ilustra alguns exemplos de *wavelets* mãe.



Figura 8 – Algumas formas de *wavelets* mãe. (Fonte: Barbosa (2010), adaptado de Addison (2002)).

4.2.1 A Transformada Wavelet Contínua

A Transformada *Wavelet* de um sinal contínuo no tempo, indicado por x(t), é dado pela equação 12.

$$T(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$
(12)

Nessa equação, o termo $\frac{1}{\sqrt{a}}$ representa a função peso da mesma, e Ψ^* , o conjugado da função *wavelet* utilizada, enquanto que os parâmetros *a* e *b* indicam as características referentes de escala e deslocamento temporal conforme descrito anteriormente.

Além disso, a partir da Transformada *Wavelet* é possível, utilizandose da transformada inversa mostrada na equação 13, obter novamente o sinal temporal x(t), desde que a mesma seja integrável em todas as escalas e localidades (BARBOSA, 2010).

$$x(t) = C_g^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{0}^{\infty} T(a, b) \Psi_{a, b}(t) (a^{-2} da) db$$
(13)

Nessa equação o termo C_g indica a condição de admissibilidade.

4.2.2 A Transformada Wavelet Discreta

A Transformada *Wavelet* discreta de um sinal temporal pode ser obtida conforme equação a seguir:

$$WT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) dt$$
(14)

Nessa equação, como podem ser verificados, os valores de *m* e *n* indicam os passos de discretização tanto na escala como na translação da mesma. Já os valores de a_0 e b_0 são os valores de passo relacionados respectivamente à escala e a translação da *wavelet* mãe.

Para os casos de sinais já discretizados e que serão analisados através da Transformada *Wavelet*, pode-se utilizar a seguinte:

$$WT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k)\Psi\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) dt$$
(15)

Quando um sinal amostrado tem sua Transformada *Wavelet* discreta calculada, obtêm-se os coeficientes conhecidos como detalhes (*D*) que caracterizam seus componentes de alta frequência. Para a obtenção dos coeficientes de aproximação (*A*), que possuem informações referentes à banda de baixa frequência do sinal, deve-se utilizar a função conhecida como *wavelet* pai (Φ), conforme equações a seguir:

$$\Psi_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \Phi(2^{-m}t - n)$$
(16)

$$A_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Phi_{m,n}(t) dt$$
(17)

4.2.3 Análise Multirresolução (AMR)

O princípio básico da análise multirresolução baseia-se na análise do sinal através de uma combinação da função de escala, ou *wavelet* pai (Φ), e da *wavelet* mãe (Ψ). Dessa forma, obtêm-se a aproximação do sinal (A) e o detalhe do mesmo (D). De forma análoga, é realizada a convolução do sinal como um filtro passa-baixa, obtendo-se a aproximação, e por um filtro passa-alta, obtendo-se o detalhe. Essa filtragem é realizada de forma sucessiva como pode ser visto na Figura 9.



Figura 9 – Análise multirresolução de um sinal (Fonte: Adaptado de DE OLIVEIRA (2007)).

Pode-se inferir dessa análise que o sinal é decomposto em vários níveis com a característica de que a banda de frequência se reduz pela metade em cada um deles. Isso pode ser verificado pelo fato que o sinal a ser filtrado novamente é o da saída do filtro passa-baixa. Dessa forma, já houve uma filtragem anterior que reduziu sua banda de frequência (BARBOSA, 2010).

De maneira matemática as equações que regem a AMR são dadas a seguir, onde os vetores h[] e g[] indicam os coeficientes do filtro passa-baixa e passa-alta, respectivamente.

$$\Phi(t) = \sqrt{2} \sum_{n \in \mathbb{Z}} h_n \Phi(2t - n)$$
(18)

$$\Psi(t) = \sqrt{2} \sum_{n \in \mathbb{Z}} g_n \Phi(2t - n) \tag{19}$$

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em sistemas de distribuição, a ocorrência de faltas (curtos-circuitos) é uma situação indesejável, porém, inerente à operação, devido, principalmente, à característica aérea de construção das redes. Contudo, para evitar danos em equipamentos e instalações das concessionárias e clientes, devido aos efeitos da ocorrência de curtos-circuitos, estas faltas devem ser eliminadas com rapidez. Para isso, existem na subestação, e em trechos da rede, equipamentos destinados à detecção e retirada de operação do trecho defeituoso ou faltoso.

Neste cenário, para um bom número das ocorrências dos curtoscircuitos, o valor da corrente de falta resultante é suficiente para sensibilizar os dispositivos de proteção e, dessa forma, possibilitar a isolação do alimentador ou do trecho sujeito à ocorrência. No entanto, em alguns casos, o valor da corrente é baixo, devido à superfície em contato com o condutor ser de alta impedância, implicando em amplitudes menores que o ajuste dos equipamentos utilizados (Aucoin et al., 1989). Sendo assim, essas situações colocam em risco não apenas as instalações, como também as pessoas e os animais, tendo em vista a possibilidade, por exemplo, de um condutor rompido e caído no solo permanecer energizado.

Tendo em vista a seriedade do problema em termos de segurança e os ganhos possíveis nos indicadores de continuidade dos consumidores quando da detecção e da localização de uma falta de alta impedância, observa-se nas últimas décadas grande interesse da comunidade científica e das concessionárias de energia no tema. Esse interesse tem implicado no melhor entendimento das características de uma FAI e possibilitado, dessa forma, diferenciá-la de outros eventos normais do sistema, como energização de transformadores e chaveamentos de bancos de capacitores (EMANUEL et al., 1990; SHARAF et al., 1993).

Vale ressaltar ainda que os novos métodos de detecção e localização de FAI têm-se utilizado normalmente de técnicas inteligentes como RNA (YANG et al., 2004; BAQUI et al., 2005), sistemas *Fuzzy* (SF) (FLAUZINO, 2007) e filtragens do sinal a partir de transformadas *Wavelets* (ELKALASHY et al., 2007a; ELKALASHY et al., 2007b; ELKALASHY et al., 2007c; GARCIA & PAREDES, 2011), de forma a extrair determinadas características dos sinais de corrente.

Neste contexto, e de forma a fornecer uma base sólida para o

desenvolvimento do trabalho, este capítulo apresentará uma revisão bibliográfica dos principais tópicos relacionados ao tema, bem como uma análise de alguns dos principais trabalhos publicados e tomados como base da literatura correlata.

A composição desse capítulo começa com a apresentação e discussão das principais causas das situações transitórias em sistemas elétricos de potência com foco na distribuição, bem como suas características. Entre esses transitórios, especial ênfase é dada as faltas de alta impedância. Também são listados os principais trabalhos encontrados na área de detecção de faltas de alta impedância, com especial atenção aos métodos com utilização de técnicas inteligentes e das Transformadas *Wavelets*. São apresentados e comentados alguns dos trabalhos observados até o momento refletindo os métodos de localização de faltas em sistemas de transmissão e distribuição, bem como de alta impedância.

5.1 TRANSITÓRIOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Um sistema elétrico de potência pode, em última instância, ser representado a partir de um circuito que terá, em menor ou maior quantidade, valores de resistência, capacitância e indutância. Essas características, quando o sistema encontra-se em um estado estacionário, implicam em uma troca constante de energia entre os elementos capacitivos e indutivos do mesmo à medida que há a variação de tensão e corrente na frequência nominal do sistema. Essa energia é armazenada no campo magnético de um indutor e é dada por $\frac{1}{2}LI^2$. Já no capacitor, a mesma é armazenada no campo elétrico e seu valor é proporcional a $\frac{1}{2}CV^2$ (GREENWOOD, 1991).

Sendo assim, quando há uma alteração nas condições do circuito, como a entrada em operação de um banco de capacitores, há um período para que ocorra a redistribuição de energia entre os diversos elementos capacitivos e indutivos do sistema. Esse tempo é finito e ocorre tendo em vista os seguintes aspectos (GREENWOOD, 1991):

- A corrente em um indutor não pode variar instantaneamente;
- A tensão em um capacitor não pode variar instantaneamente;
 e,
- O princípio da conservação de energia.

Dessa forma, pode-se entender que um transitório eletromagnético é um fenômeno vinculado às variações de energia que ocorrem quando da mudança de estado de um sistema elétrico ocasionando o aparecimento de alterações excessivas de tensão e correntes, que podem gerar danos em elementos e equipamentos do mesmo. Esse fenômeno pode ser tanto interno ao sistema, como, por exemplo, um curto-circuito, ou externo, causado por uma descarga atmosférica (GREENWOOD, 1991).

Entre os diversos tipos de transitórios eletromagnéticos verificados nos sistemas elétricos de potência, serão alvos de maior detalhamento nesse estudo os seguintes:

- Chaveamento de bancos de capacitores;
- Energização de transformadores;
- Partida de motores;
- Operação de Fornos à Arco; e
- Faltas de alta impedância.

5.1.1 Chaveamento de Bancos de Capacitores

A utilização de bancos de capacitores *shunts* em sistemas de distribuição de energia elétrica é algo comum, tendo em vista a necessidade da correção do fator de potência, assim como, em um segundo momento, para prover a correção da tensão em alguns pontos. Sua entrada ou saída de operação ocorre conforme haja variações nos aspectos mencionados e seja necessário o retorno dos mesmos a níveis aceitáveis. Um exemplo da localização de bancos de capacitores $(C_1 e C_2)$ em um barramento é mostrado na Figura 10.



Figura 10 – Sistema elétrico com bancos de capacitores (Fonte: GREENWOOD, 1991).

Como a entrada em operação de um banco de capacitor acarreta a mudança da capacitância do sistema elétrico, é fácil concluir que haverá o aparecimento de um transitório eletromagnético. De forma a avaliar o comportamento desse transitório, duas situações são comumente consideradas:

- Chaveamento de um banco isolado; e
- Chaveamento de um banco com outro já em operação (back-toback).

5.1.1.1 Chaveamento de um Banco de Capacitor Isolado

A entrada em operação de um banco de capacitor isolado caracteriza-se quando não há nenhum outro banco em operação no sistema. Nesse caso, haverá um transitório com frequência dada pela equação a seguir (FERREIRA, 2010).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_sC}} \tag{20}$$

Nessa equação, L_S representa a indutância equivalente do sistema elétrico em análise.

Já o valor de pico de corrente pode ser obtido também através dos parâmetros do sistema conforme mostrado na equação 21 (FERREIRA, 2010).

$$I_{Cmax} = \frac{V_{max}}{\sqrt{\frac{L_S}{C}}}$$
(21)

33

É importante ainda ter conhecimento de que o valor de tensão sobre o capacitor pode chegar a até duas vezes o valor da tensão máxima do sistema durante o transitório (FERREIRA, 2010). Na Figura 11, pode-se verificar o transitório na fase *A* quando do chaveamento de um banco capacitor isolado localizado em uma subestação de transmissão com tensão de pico monofásica de cerca de 623 kV (sistema de 765 kV). Nesse caso, a tensão chegou aproximadamente a $2V_{máx}$, ou seja, 1.245 kV (FERREIRA, 2010).



Figura 11 – Transitórios observados nas formas de ondas da corrente e da tensão na fase C quando do chaveamento de um banco de capacitores isolado (Fonte: FERREIRA, 2010).

5.1.1.2 Chaveamento Back-to-Back de um Banco de Capacitor

A energização de um banco de capacitor com outro já em operação é conhecido como *back-to-back*. A frequência do transitório pode ser obtida pela equação a seguir (FERREIRA, 2010).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}}} \tag{22}$$

Nessa equação, os valores de L_{eq} e C_{eq} referem-se à indutância e capacitância equivalente do sistema elétrico de potência quando da energização do banco de capacitores. Para a determinação do valor de pico da corrente de energização, tem-se a equação 23 (FERREIRA, 2010).

$$I_{max} = \frac{V_{Cmax}}{\sqrt{\frac{L_{eq}}{C_{eq}}}}$$
(23)

Nessa situação de chaveamento, normalmente, o transitório gerado é em uma frequência maior que no caso de energização de um banco isolado. Na Figura 12 é possível verificar o transitório gerado com frequência próxima de 15 kHz.



Figura 12 – Corrente de energização decorrente do chaveamento *back-to-back* (Fonte: FERREIRA, 2010).

Pode haver ainda uma tensão remanescente no banco de capacitor a ser chaveado. Nessa situação, primeiramente, há a equalização da tensão deste com os já existentes no sistema, ocasionando um transitório rápido. Após isso, tendo em vista o fato que a tensão no sistema no instante é normalmente diferente da tensão sobre os bancos de capacitores, ocorre um novo transitório de forma a equalizar todas as tensões (GREENWOOD, 1991). Na Figura 13 é possível verificar a presença de duas frequências de transitório quando da energização de um banco de capacitores na situação *back-to-back* com tensão remanescente. Inicialmente há um transitório em 9,6 kHz devido à equalização dos bancos de capacitores. Após, ocorre outro transitório entre esses bancos equalizados e o sistema elétrico em questão. No caso, o segundo transitório do sistema mostrado é de 439,7 Hz.



Figura 13 – Transitório de tensão na energização de um banco de capacitor com outro já em operação (Fonte: GREENWOOD, 1991).

5.1.2 Energização de Transformadores: Corrente de Magnetização

Transformadores são equipamentos extremamente importantes e essenciais para o SEP devido a sua capacidade de compatibilizar os níveis de tensão. Essa característica é de grande importância, tendo em vista a necessidade de transferência de potência entre grandes distâncias, onde uma elevação do nível de tensão possibilita a redução das correntes e, consequentemente, menores perdas. Além disso, menores valores de tensão no ponto de entrega dos consumidores garante maior segurança em relação a acidentes. O funcionamento deste elemento do SEP se baseia na existência de um fluxo magnético em seu núcleo. Esse fluxo, que surge através da tensão aplicada no enrolamento primário, é responsável pelo aparecimento da tensão no secundário do equipamento e, em conjunto com a carga ligada, na corrente do mesmo.

No estudo de fenômenos transitórios, a corrente de magnetização de

um transformador se mostra de extrema importância devido as suas características típicas, e ao fato de sua ocorrência ser causada tanto pela energização do mesmo, como por eventos relacionados à eliminação de faltas externas no sistema em análise (HARLOW, 2007).

A amplitude da corrente de magnetização se deve inicialmente à existência de um fluxo residual no núcleo do transformador. Esse fluxo aparece quando o transformador já estava em operação normal e foi desligado. Na Figura 14 é possível verificar a curva de histerese de um transformador, onde o valor Φ_R indica o fluxo residual quando do desligamento do mesmo. Devido às capacitâncias internas, esse valor se reduz até Φ_1 , que é o valor considerado na energização do transformador. De forma a verificar o pior caso, considera-se que na energização do transformador, uma tensão é aplicada no enrolamento primário com polaridade que possibilita o aumento do fluxo magnético. Dessa forma, o fluxo aumenta até o valor de Φ_M , ocasionando a saturação do núcleo e, consequentemente, um grande valor de corrente. Quando o fluxo devido à variação da tensão aplicada começa a reduzir, seu valor irá atingir novamente o valor de Φ_1 . No entanto, o pico de corrente será menor (GREENWOOD, 1991). Essa situação pode ser vista também na Figura 15.



Figura 14 – Curva de histerese na energização de um transformador (Fonte: GREENWOOD, 1991).

A Figura 16 mostra uma forma de onda típica de corrente de

magnetização de um transformador. Como o sistema formado na energização do transformador possui características de um circuito *RL*, a assimetria ocorre devido a um componente exponencial contínuo. Esse componente se reduz a uma constante de tempo $\frac{L}{R}$, retornando a um valor simétrico após isso.

Um aspecto importante desse tipo de transitório é relacionado ao seu conteúdo harmônico. Conforme apresentado por Coury et al. (2007), em correntes provenientes da magnetização de transformadores, há uma forte presença de harmônicos de segunda e quantidades menores de harmônicos de quinta ordem.





5.1.3 Partida de Motores

No acionamento de motores de indução trifásicos, há, inicialmente, uma corrente de grande magnitude, em torno de sete vezes a corrente nominal (UMANS, 2014). Em um motor de indução, essa corrente tem seu valor reduzido na medida em que há uma diminuição do escorregamento entre as espiras do rotor e o campo girante do estator (DECKMANN & POMILIO, 2010). Em paralelo a isso, há ainda a ocorrência de um afundamento de tensão¹, durante todo o período de partida do mesmo. Esse afundamento de tensão pode ser equacionado da seguinte forma:

$$\Delta V_{pu} = \frac{R_s.P + X_s.Q}{V^2} \tag{24}$$



Figura 16 – Corrente diferencial de magnetização de um transformador qualquer. (Fonte: Próprio Autor).

Importante salientar que o afundamento de tensão impacta em todos os consumidores ligados no sistema elétrico em questão em maior ou menor grau. Na equação supracitada, tem-se que R_S e X_S indicam, respectivamente, os valores de resistência e reatância do cabo alimentador do motor; $P \in Q$, os valores de potência ativa e reativa absorvidos pelo motor; e V a tensão de alimentação no motor.

Em Deckmann et al. (2010), propõem-se que o valor de R_S é muito menor que X_S , e além disso, tem-se que a potência de curto-circuito (S_{CC}) é aproximadamente a razão entre V^2 e X_S . Dessa forma, a equação pode ser alterada para:

¹ Afundamentos de tensão estão relacionados a variações momentâneas de tensão, valor remanescente de 0,1 p.u. e 0,9 p.u. e duração de um ciclo a três segundos, e variações temporárias de tensão, valor remanescente igual à situação temporária mas a duração é maior que 3 segundos e menor a três minutos (ANEEL, 2014).

$$\Delta V_{pu} \cong \frac{Q}{S_{CC}} \tag{25}$$

Dessa forma, pode-se concluir que a queda de tensão no início da partida do motor é maior devido à absorção de potência reativa relacionada à magnetização do motor.

Na Figura 17 pode-se verificar a corrente e tensão quando da partida de um motor de indução.



Figura 17 – Tensão e corrente de partida de um motor de indução (Fonte: DECKMANN & POMILIO, 2010).

Um aspecto importante refere-se às técnicas que possibilitam reduzir

o valor das correntes de partidas de motores. Entre essas, destacam-se:

- Partida com soft-starter com utilização de tiristores;
- Partida com motor a vazio;
- Partida utilizando chave estrela-triângulo; e
- Inversores de frequência

A utilização de cada uma dessas técnicas dependerá da potência do motor e do custo de implementação.

5.1.4 Fornos a Arco

Nas indústrias do ramo siderúrgico, há uma utilização muito grande de fornos a arco elétrico. Estes equipamentos são de grande utilização na transformação de sucatas em ligas de aço. De maneira geral, seu funcionamento se baseia na formação de um arco elétrico entre eletrodos de forma a gerar calor necessário para que ocorra a fusão da sucata.

De forma a possibilitar a formação e sustentação do arco elétrico, há a necessidade que o circuito tenha fortes características indutivas com fator de potência podendo ser menor que 0,8. Outro aspecto importante refere-se à resistência do arco elétrico criado tendo em vista a dinâmica instável do mesmo. Dessa forma, mesmo com um sistema de controle existente no forno a arco, sempre ocorre certa variação do valor da resistência e, consequentemente, da corrente fornecida pelo sistema para manutenção do mesmo. Dessa forma, faz-se presente na corrente conteúdo harmônico e interharmônico que acarretam na distorção da forma de onda existente (DECKMANN & POMILIO, 2010). Na Figura 18 é possível verificar a forma de onda de corrente de um forno a arco.

A constituição harmônica da corrente pode ainda ser visualizada na Figura 19, onde é possível notar, além da componente fundamental, a existência de outras componentes harmônicas (múltiplas inteiras da componente fundamental) e interharmônicas (múltiplas não inteiras da componente fundamental) citadas anteriormente.

5.1.5 Faltas de Alta Impedância (FAI)

As faltas de alta impedância possuem como uma de suas principais características correntes de baixa amplitude e, em função disso, podem não ser detectadas pelos sistemas convencionais de proteção, tais como relés de sobrecorrente unidirecionais. Exemplos de ocorrências deste tipo de falta são galhos de árvores tocando condutores, isoladores com correntes de fuga e condutores energizados em superfícies com alto valor de impedância.



Figura 18 - Corrente de um forno a arco (Fonte: DECKMANN & POMILIO, 2010).



Figura 19 – Espectro harmônico da corrente de um forno a arco (Fonte: DECKMANN & POMILIO, 2010).

Em Aucoin et al. (1989) foram estudadas várias ocorrências de faltas de alta impedância onde apenas 10% das mesmas foram detectadas pelos sistemas convencionais de relés de sobre corrente. Além disso, em cerca de 20% das ocorrências foram detectados períodos em que o valor RMS de corrente era próximo de zero amperes.

Na Tabela 3 são mostrados alguns valores de corrente de falta em determinadas superfícies onde, pela amplitude e pela superfície de contato, pode-se

verificar que se trata de ocorrência de alta impedância. Pode-se notar ainda que, caso ocorra alguma falta deste tipo em um alimentador com carga considerável, as mesmas podem ser confundidas com variações normais do sistema, não sendo detectadas e, consequentemente, extintas. Dessa forma, torna-se de extrema importância um estudo mais aprofundado das características de uma FAI.

Tabela 3 – Valores típicos de correntes de faltas de alta impedância (AUCOIN et al.,1989).

	Corrente
Superfície	(A)
Asfalto seco ou areia	0
Areia molhada	15
Relva seca	20
Grama seca	25
Relva molhada	40
Grama molhada	50
Concreto reforçado	75

5.1.5.1 Características das Faltas de Alta Impedância

As faltas de alta impedância possuem algumas características que podem auxiliar na sua detecção. Dentre as características principais de uma falta de alta impedância, destaca-se, inicialmente, a presença de arco elétrico.

Uma das características de ocorrência de faltas de alta impedância provém da queda de condutores em uma superfície de alto valor de resistividade. Inicialmente, quando da ocorrência desses eventos, não há condução de corrente para o solo. À medida que a magnitude da tensão aumenta, há a diminuição do valor de resistência vinculado ao dielétrico do ar e, após determinado valor, o rompimento do mesmo. Com isso, há um aumento da energia cinética dos elétrons livres devido à aceleração dos mesmos em função do campo elétrico gerado e, consequentemente, há o aparecimento de corrente do condutor para o solo. A amplitude dessa corrente aumenta à medida que há um aumento da tensão no ponto de contato, ocasionando o aparecimento do arco elétrico. Quando o valor de tensão reduz, tendo em vista a característica senoidal da mesma, há o aumento da resistência vinculada ao dielétrico e, dessa forma, a diminuição do valor de corrente (Nakagomi, 2006). Caso o valor da resistência seja grande o suficiente, não haverá condução de corrente. Essa situação acarreta descontinuidades na corrente de falta nas proximidades da passagem pelo zero conforme pode ser observado na Figura 20.



Figura 20 – Detalhe da corrente caracterizada por uma falta de alta impedância (Fonte: SULTAN, 1992).

Além dessa característica, muitos outros aspectos foram estudados a respeito das faltas de alta impedância. Dentre essas publicações, destaca-se Emanuel et al. (1990), onde foram estudadas as características de faltas de alta impedância em solos arenosos. Através de um experimento mostrado na Figura 21, foram simuladas faltas de alta impedância e os dados de corrente e tensão foram oscilografados. Nesse experimento, a tensão secundária de 7.900 V de um transformador, com alimentação primária de 240 V, foi aplicada em um cilindro metálico de 30 centímetros de diâmetro e 50 centímetros de altura, preenchido com areia. Além disso, um resistor variável foi inserido em série de forma a simular a resistência de caminho de terra do sistema.

Analisando os dados obtidos através de um oscilógrafo, os autores conseguiram verificar que as magnitudes de corrente nos semiciclos positivos e negativos não são simétricas, ou seja, possuem valor de pico diferente. Além disso, as tensões de ignição e extinção dos semiciclos positivos e negativos, respectivamente V_P e V_N , mostram-se assimétricas, com valores maiores para o semiciclo negativo.

Para Oscilógrafo



Figura 21 – Experimento realizado para a caracterização de arco elétrico em solo arenoso (Fonte: Emanuel et al., 1990).

A magnitude dos valores de tensão V_P e V_N é dependente dos parâmetros do solo relacionados à porosidade e umidade do mesmo. Quanto mais poroso e seco o mesmo, maiores serão os valores das tensões citadas. Além disso, a assimetria anteriormente citada é referenciada ao fato de ocorrer, quando da existência do arco elétrico, o aquecimento da sílica nas proximidades do mesmo funcionando como um catodo. Dessa forma, devido à emissão de elétrons do mesmo, há o aparecimento de uma menor queda de tensão no semiciclo positivo.

Outro aspecto verificado no estudo citado refere-se ao fato que o arco elétrico não ocorre logo no início da energização, quando há umidade no solo. O arco elétrico somente irá ocorrer após o aquecimento do solo. Isso se deve ao fato que inicialmente há a evaporação da umidade próxima do ponto de contato e, após o aumento da porosidade do solo, o aparecimento do arco elétrico.

Por fim, um modelo é proposto para a simulação de faltas de alta impedância. Esse modelo é formado por duas fontes de tensão contínua, $V_P \in V_N$, em antiparalelo com dois diodos. Dessa forma, durante o semiciclo positivo, há passagem de corrente pelo diodo ligado a fonte V_P . Quando a tensão do sistema ultrapassa esse valor, da mesma forma, no semiciclo negativo, ocorrerá a passagem de corrente quando o valor da tensão for menor que V_N . A Figura 22 mostra este modelo.



Figura 22 – Modelo apresentado por Emanuel et al. (1990) para faltas de alta impedância.

Em Nam et al. (2001) e em Nakagomi (2006) são mostradas algumas características mais amplas referentes à corrente de falta de alta impedância. Estas características são:

- Assimetria: há diferença de amplitude entre o semiciclo positivo e negativo;
- Não-Linearidade: a curva característica de tensão por corrente é não linear;
- Buildup: a corrente crescerá gradualmente até seu valor máximo;
- Shoulder: durante o buildup haverá alguns patamares de amplitude que permanecerão por alguns ciclos; e
- Intermitência: devido à extinção temporária do arco elétrico, haverá momentos de não condução de corrente. Este tempo dura até a reignição do arco elétrico.

Na Figura 23 é possível verificar todas as características informadas anteriormente. A envoltória da corrente aumenta ao longo do curto-circuito indicando o chamado *buildup*. Além disso, há a intermitência da corrente e momentos de estagnação em termos de amplitude, caracterizando o *shoulder*. Nos detalhes da figura, é possível visualizar a ocorrência das descontinuidades e assimetria da corrente.



Figura 23 – Oscilografia de uma corrente de falta de alta impedância (Fonte: NAKAGOMI, 2006).

Dessa forma, pode-se concluir que a corrente característica de uma falta de alta impedância possui certo grau de distorção, diferenças de amplitude entre os semiciclos, intermitência e amplitude crescente ao longo de sua ocorrência.

Analisando essas características, alguns aspectos harmônicos da mesma podem ser obtidos (NAKAGOMI, 2006):

- Componentes harmônicos de baixa ordem (até décima ordem) surgem devido a não linearidade da corrente;
- Componentes harmônicos de ordem par surgem devido à assimetria entre os semi-ciclos;
- Componentes harmônicos de alta ordem surgem devido à intermitência da corrente caracterizada pela extinção e reignição do arco elétrico; e
- Componentes interharmônicos surgem devido à variação da amplitude ao longo do período de ocorrência da FAI.

5.2 PRINCIPAIS TRABALHOS A RESPEITO DA DETECÇÃO DE FAI

Ao longo das últimas décadas, vários métodos têm sido propostos e

discutidos para a detecção de faltas de alta impedância. No entanto, apesar de todos os esforços, o problema segue em aberto ainda devido, principalmente, a complexidade das variáveis envolvidas.

Em Aucoin et al. (1989) é apresentado um estudo realizado na Universidade Texas A&M que concluiu que para que houvesse a detecção de uma FAI com alto grau de segurança, deveriam ser monitorados os seguintes aspectos:

- Variações de energia em uma banda de frequência;
- Variações randômicas na amplitude de corrente;
- Ângulo de ocorrência de picos de corrente em relação à tensão;
- Espectro harmônico de corrente; e
- Análise de perfil de carga do sistema.

Ainda nesse mesmo estudo, os autores concluem que para a implementação de algoritmos para monitorar os aspectos descritos acima, faz-se necessária a utilização de métodos inteligentes de aprendizagem.

Em consenso com essa visão da necessidade de métodos baseados em inteligência artificial, Sultan et al. (1992) utilizaram uma rede neural formada por um *perceptron* multicamada com um camada escondida para detecção de uma FAI. Nesse método, o valor RMS da corrente é monitorado. Quando o mesmo é suficientemente diferente de um valor típico de referência, são obtidas 32 amostras de corrente. Essas amostras são então utilizadas, depois de normalizadas, como entrada do perceptron multicamada em conjunto com um elemento cujo valor será "0" ou "1" em função da quantidade de amostras com valor maior que 30% do valor de pico instantâneo de corrente, totalizando 33 neurônios de entrada. A saída do PMC será então um valor binário, onde "1" indica a detecção de uma FAI e "0", não. Segundo os autores, o algoritmo detectou corretamente cerca de 75% das faltas simuladas. No entanto, verificou-se que na presença de cargas como fornos a arcos, o algoritmo detectou cerca de 20% das mesmas incorretamente como faltas de alta impedância.

Alguns métodos propostos utilizam-se da análise de componentes harmônicos da corrente de falta (SHARAF et al., 1993; LAZKANO et al., 2000; MOMOH et al., 1992). Em Sharaf *et al.* (1993), o algoritmo apresentado utiliza-se de um PMC, e tem como entrada os harmônicos de segunda, terceira e quinta ordem de tensão e corrente, bem como a potência remanescente na barra. Nesse trabalho foram analisadas trinta e duas situações entre faltas de alta impedância, entrada e saídas de cargas lineares e não lineares e chaveamento de bancos de capacitores. No método proposto, caso ocorresse a detecção de uma FAI pelo PMC por cinco ciclos subsequentes, um sinal seria enviado ao religador. Em todos os casos, o algoritmo detectou corretamente a ocorrência de uma FAI.

Considerando ainda a análise harmônica da falta de alta impedância, Lazkano et al.(2000) propuseram um método estatístico baseado em observações de curto, médio e longo prazo das componentes de segunda, terceira, quarta, quinta, sétima e nona ordem da corrente 3I₀ (três vezes a corrente do neutro). Nesse método, os valores das mesmas eram analisados tendo como base valores préestabelecidos e que são atualizados de forma dinâmica pelo algoritmo. Foram simuladas trinta e duas situações de falta em campo e cem situações de não faltas. Segundo os autores, a taxa de acerto foi de 84,37%.

Em Al-Dabbagh et al. (1999), os autores discutem a dificuldade de detecção de uma FAI em sistemas solidamente aterrados através do relé de neutro devido à existência de desequilíbrios de carga e capacitâncias mútuas. Nesse mesmo trabalho, um método utilizando também um PMC é proposto para diferenciar eventos normais de faltas no sistema elétrico.

Métodos de detecção baseados em ondas viajantes também foram propostos como em Silva et al. (1995). Nesse trabalho, um pequeno sinal é inserido na entrada do alimentador. Quando do retorno deste, haverá certo padrão de resposta em frequência relacionado à configuração do alimentador. Tendo em vista as alterações que podem ocorrer no sistema elétrico e caracterização de distintas respostas em frequência (considerando a operação de chaves, a retirada de transformadores e transferências de cargas), faz-se necessário que todas as configurações tenham seu espectro de frequência verificado. Essas respostas são armazenadas então em um banco de dados de forma que o sinal medido seja comparado com as mesmas e a dispersão seja obtida. Utilizando então um sistema *fuzzy*, o sistema proposto determina se a dispersão é pequena, média, grande ou inaceitável e, baseado em regras propostas, se há ou não a ocorrência de uma falta no sistema. Segundo os autores, 100% dos casos sem falta e com as configurações utilizadas no banco de dados tiveram correta classificação, bem como 100% de faltas ocorridas em diversos pontos do alimentador. Ressalvas são feitas para faltas
próximas de chaves, cerca de 10 metros das mesmas, onde o percentual de detecção correta foi de apenas 36%.

Em Wai & Yibon (1997) um método novo tendo como base um banco de filtros para análise através da Transformada *Wavelet* foi apresentado. Os autores propõem a utilização da Transformada *Wavelet* mãe *quadratic spline* de forma a obter os detalhes $d_1 e d_2$ do mesmo. Tendo em vista a taxa de amostragem considerada de 20 kHz, os detalhes $d_1 e d_2$ contém, respectivamente, os componentes de alta frequência entre 5 e 10 kHz e entre 2,5 e 5 kHz. A partir da análise dos detalhes extraídos, os autores concluem que os instantes de ocorrência de pontos de máximo nos detalhes supracitados podem ser utilizados para diferenciar uma falta de alta impedância de um evento de chaveamento de banco de capacitor, por exemplo.

Após esse trabalho pioneiro com a utilização da Transformada *Wavelet*, alguns autores propuseram sua utilização a partir de uma análise temporal dos coeficientes obtidos. A utilização da Transformada *wavelet* mãe *Daubechies* 4 foi proposta por Lazkano et al. (2000; 2001). Nesse trabalho, os autores realizaram a decomposição da corrente 3I₀ em nós de coeficientes através da utilização da Transformada *Wavelet* descrita anteriormente, obtendo os sinais relativos ao filtro passa-baixa e passa-alta para cada nível conforme mostrado na Figura 24. A partir do quarto nível de decomposição proposto, são reconstruídos os sinais vinculados aos nós (4,1), (4,2), (4,3), (4,5) e (4,6). Para cada um desses sinais são verificados então os seguintes aspectos:

- O percentual de valores de picos nas zonas I e III conforme divisão do sinal mostrado na Figura 25; e
- A relação entre a potência média na frequência de 100 Hz e a potência média de cada sinal reconstruído.

Cada parâmetro destes é calculado a cada ciclo para cada um dos nós considerados. Caso o valor seja maior que um limite pré-determinado, um contador é incrementado. Para ocorrer a detecção de uma falta com presença de arco elétrico, duas situações são possíveis:

> Um dos contadores de (4,1), (4,2) e (4,3) e um dos contadores de (4,5) e (4,6) atingem um valor máximo determinado; e

 Mais de um contador referente aos nós (4,1), (4,2) e (4,3) atingem seus máximos.

Segundo os autores, para os eventos de FAI simulados em campo, quando a corrente $3I_0$ foi maior que 2 A, todos foram corretamente identificados. Foram analisados ainda dados de 155 eventos reais com um índice de assertividade de 99,5%.



Figura 24 - Nós de coeficientes de quarto nível (Fonte: LAZKANO et al., 2001).



Figura 25 – Divisão por zonas do sinal reconstruído através dos coeficientes do nó (Fonte: LAZKANO et al., 2001).

Em Mokhtari & Aghatehrani (2005), um método utilizando também a Transformada *Wavelet* mãe *Daubechies* 4 é apresentado em conjunto com uma rede neural artificial. Neste trabalho, o sinal de entrada inicialmente é filtrado através da Transformada *Wavelet*, obtendo então os detalhes de primeira, segunda e terceira ordem, respectivamente d_1 , d_2 e d_3 . O primeiro ciclo de d_1 é então dividido em quatro partes iguais. Com isso, é determinada a energia em cada uma dessas partes e também de d_2 e d_3 , totalizando as seis entradas da RNA. O cálculo da energia pode ser obtido através dos coeficientes obtidos conforme a equação abaixo:

$$E = \sum x(i)^2 \tag{26}$$

Para a obtenção dos conjuntos de teste e validação, um sistema de distribuição foi modelado contendo um alimentador de 20 quilômetros com tensão de 20 kV e carga ligada no final do mesmo. Segundo os autores, foram utilizados apenas 110 casos de FAIs e eventos de chaveamento para treinamento da RNA. Para validação, 3.200 padrões para faltas de alta impedância e 4.500 casos de eventos relacionados a chaveamentos de carga e capacitores. Em todos os casos, o índice de acerto foi de 100%.

Em 2006, Elrefaie propôs um método de detecção de faltas de alta impedância utilizando também a Transformada *Wavelet* mãe *Daubechies* 4. Nesse trabalho foi analisada a utilização do método de Prony, cujo objetivo é estimar a frequência, magnitude, fase e oscilações presentes nos sinais, em conjunto com os detalhes do primeiro (d_1) e segundo nível (d_2). Segundo os autores, foi possível verificar que a quantidade de picos de valores nesses detalhes, e o instante em que os mesmos ocorrem podem ser utilizados para diferenciar uma FAI de um evento de chaveamento de bancos de capacitores. Já para a diferenciação de uma FAI em relação a corrente de energização de transformador e de carga de um forno a arco, os dados não foram conclusivos.

Já em Yang et al. (2004), foi utilizada a *Daubechies 10* como *Wavelet* mãe devido, segundo os autores, a um menor esforço computacional, assim como um melhor desempenho. Nesse artigo, é realizada a extração do detalhe de primeira ordem do sinal de corrente e de tensão de cada fase. Na Figura 26 são mostrados os valores dos coeficientes do detalhe de primeira ordem de corrente na fase *A*. Os valores são aproximadamente zero até a ocorrência da falta em 20 milissegundos, após isso, tem-se um salto dos valores dos coeficientes com intermitência durante o período total do evento de cinco ciclos.



Figura 26 – Coeficientes obtidos de um sinal de corrente quando da ocorrência de uma FAI (Fonte: YANG et al., 2004).

Baseado nessa característica, os autores propõem o cálculo do coeficiente de variação do detalhe de primeira ordem, $d_1[n]$, de cada tensão e corrente pelos cinco ciclos de simulação dos eventos. Dessa forma, visa-se reduzir a quantidade de entradas de uma rede neural a ser utilizada. Esta tem vinte neurônios na primeira camada escondida, dez neurônios na segunda camada e três neurônios de saída. A saída da rede neural empregada apresenta a seguinte interpretação:

- Primeiro neurônio: "0" indica não haver falta, e "1" indica a ocorrência de falta;
- Segundo neurônio: "0" indica chaveamento normal de carga, "1" indica um chaveamento de banco de capacitor e "2" indica a ocorrência de uma FAI; e
- Terceiro neurônio: "0" indica não haver falta, "1" indica uma FAI na fase A, "2" indica uma FAI na fase B e "3" indica uma FAI na fase C.

Nesse estudo foram simulados 600 casos entre faltas de alta impedância, chaveamento de bancos de capacitores e chaveamento de cargas. Destes, 500 foram utilizados para o treinamento da rede neural e 100 para a etapa de testes da mesma. Segundo os autores, na topologia proposta, o algoritmo detectou corretamente 100% dos eventos.

Outra transformada mãe estudada e utilizada em diversos estudos para detecção de faltas de alta impedância é a *Daubechies* 14 (ELKALASHY et al., 2007a; ELKALASHY et al., 2007b; ELKALASHY et al., 2007c; GARCIA & PAREDES, 2011). Em Elkalashy et al. (2007a) é feita uma análise de faltas de alta impedância envolvendo o contato de condutores de média tensão com galhos de árvores. Nesse trabalho foi realizado um experimento conforme mostrado na Figura 27, onde o sinal de corrente e tensão da falta simulada foi amostrado a uma taxa de 100 kHz. Com esses dados, através da extração dos detalhes de terceira e quarta ordem, foi verificado que existem picos de valores de tensão e corrente nos momentos da passagem por zero do sinal nas bandas de frequência 6,25-12,5 kHz e 3,125-6,25 kHz.



Figura 27 – Experimento para verificação de faltas de alta Impedância (Fonte: ELKALASHY et al., 2007a).

Em complementação com esse trabalho inicial, os autores propuseram então uma metodologia para detecção de faltas de alta impedância utilizando os valores de tensão e corrente de fase (ELKALASHY et al., 2007b) e residual (ELKALASHY et al., 2007c). O método proposto tem como base inicial a extração dos detalhes de terceira ordem d_3 , considerando uma taxa de amostragem de 100 kHz, através da Transformada *Wavelet* mãe *Daubechies* 14. Para a verificação da ocorrência de uma falta de alta impedância, os autores propuseram a soma absoluta dos coeficientes d_3 através de uma janela deslizante de um ciclo conforme equação que segue.

$$S_{v}(k) = \sum_{n=k-N+1}^{k} |d_{3V}(n)|$$
(27)

No entanto, apesar de o valor de S_v indicar a ocorrência de uma falta de alta impedância, segundo o trabalho publicado, não é possível determinar, apenas a partir deste, o alimentador em falta. Através do estudo da situação, os autores verificaram que os detalhes de terceira ordem de tensão e corrente, em alimentadores sãos, estão em fase, enquanto que, em falta, estão defasados. Dessa forma, para a determinação do alimentador sob falta, os autores propuseram a equação a seguir, onde, caso o valor de P_a (Alimentador *j*) seja negativo, esse alimentador está sob falta.

$$P_{a}(Alimentador j) = \sum_{n=k-2N+1}^{k} \left| d_{3Va}(n) \ x \ d_{3Ia(Alimentador j)}(n) \right|$$
(28)

Um último dado desejado é a fase na qual está ocorrendo a falta de alta impedância. Para obtenção dessa informação, os autores verificaram que o maior produto entre os detalhes de terceira ordem de tensão ocorre entre as fases sãs. Dessa forma, foi proposta a equação a seguir onde são calculados os discriminadores *D* entre as fases, D_{ab} , D_{bc} e D_{ca} , e o maior valor indica as fases sãs.

$$D_{ab}(k) = \sum_{n=k-2N+1}^{k} |d_{3Va}(n) x \, d_{3Vb}(n)|$$
(29)

Em outro trabalho do mesmo grupo de pesquisa (ELKALASHY et al. 2007b), o método é alterado de forma a utilizar os valores residuais de tensão e corrente, ou seja, *V_r* e *I_r*. Nessa alteração, não é realizada a identificação da fase em falta. De forma a validar essa metodologia, 17 eventos oscilografados a uma taxa de amostragem de 10 kHz foram inseridos como entrada no algoritmo para utilizar o detalhe de primeira ordem de corrente e tensão residual (ELKALASHY et al., 2008a). Segundo os autores, foi verificada uma efetividade do algoritmo na detecção das faltas consideradas, sendo que o desempenho relacionado ao discriminador da ocorrência de uma falta de alta impedância, S_{Ur}, é melhor quando da presença de arco elétrico (ELKALASHY et al., 2008b).

Ainda utilizando a Transformada *Wavelet* mãe *Daubechies* 14, temse o trabalho de Garcia & Paredes (2011). Neste, um método muito próximo do descrito anteriormente é proposto, tendo em vista que a determinação da ocorrência de uma falta de alta impedância é obtida através da soma absoluta, S(k), dos coeficientes do detalhe de terceira ordem, d_3 . A classificação da fase em que há uma FAI é verificada através do maior valor obtido de S(k). Na Figura 28 são mostrados os detalhes d_3 de corrente das três fases quando da ocorrência de uma FAI na fase *A*.



Figura 28 – Detalhes de terceira ordem nas correntes de fase quando da ocorrência de uma FAI na fase *A* (Fonte: GARCIA & PAREDES, 2011).

Em Sarlak & Shahrtash (2008), um método para detecção de FAI através da diferenciação da mesma de situações normais do sistema elétrico é apresentado. Primeiramente são extraídos os detalhes de primeira a oitava ordem, bem como a aproximação de oitava ordem do sinal de corrente através de uma janela de dados de quatro ciclos, tendo como base a Transformada *Wavelet* mãe *Daubechies* 3. Para cada ciclo o valor de energia de cada um desses componentes é calculado da mesma forma que mostrado na equação 26. Esses valores são então utilizados para obtenção de 36 parâmetros conforme a equação 30.

$$F_{i} = \frac{[Energia \ (detalhe \ de \ jésimo \ nível \ ou \ aprox. \ de \ oitavo \ nível)]}{Energia \ total \ do \ sinal}$$
(30)

Esses dados foram então otimizados através de dois métodos: *Principle Component Analysis* (PCA) e *Linear Discriminant Analysis* (LDA). Os autores afirmam que o problema de detecção de faltas de alta impedância não é classificado como sendo linearmente separável. Dessa forma, para possibilitar a utilização de um classificador conhecido como *Support Vector Machine (*SVM), uma função não linear, polinomial ou *Radial Basis Function* (RBF) é utilizada para a transformação dos dados.

Através da simulação de um sistema de distribuição de teste de quatro nós, foram obtidos dados do chaveamento de carga, energização de transformadores, fornos a arco, cargas harmônicas e faltas de alta impedância a uma amostragem de 12,5 kHz. Os dados obtidos foram pré-processados pelos dois métodos descritos anteriormente e divididos em um conjunto de treinamento, 66% dos dados, e um conjunto de teste com os 34% restantes. Dessa forma, segundo os autores, o melhor desempenho foi obtido pelo SVM quando do tratamento dos dados pelo método PCA com 97,5% de assertividade.

Em Baqui et al. (2005), a detecção de faltas de alta impedância tem como base a extração dos coeficientes *wavelet* dos detalhes de primeiro a sétimo nível, além da aproximação de sétimo nível. Para isso, os autores propõem a utilização da Transformada *Wavelet* mãe *Daubechies* 5, e uma taxa de amostragem de 30 kHz. Com os dados extraídos, é então calculado, para cada corrente de fase, o desvio-padrão de cada nível ou sub-banda conforme equação a seguir.

$$std = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2}$$
(31)

Esses dados são então inseridos em uma rede neural artificial do tipo PMC com duas camadas escondidas, composta por 24 neurônios na entrada, 14 neurônios na primeira camada escondida, sete neurônios na segunda camada escondida e três neurônios na saída. De forma a validar o método proposto, um sistema foi modelado no MATLAB[®] composto por 5 alimentadores com tensão de operação de 13,8 kV. Neste sistema, foram simuladas milhares de situações de faltas de alta impedância e outras situações de chaveamento do sistema. Para os casos de alta impedância, o modelo proposto por Emanuel et al. (1990) foi utilizado. Segundo os autores, após o treinamento da RNA, o erro de detecção de uma FAI foi menor que 1%.

A detecção de faltas de alta impedância em circuitos de baixa tensão também é alvo de interesse da comunidade científica. Em Xiangjun et al. (2002), os autores propõem a utilização da Transformada *Wavelet*-mãe *Daubechies* 6 com a corrente residual amostrada a uma taxa de 5 kHz. Foram obtidos o detalhe de terceiro nível e a aproximação de terceiro nível do sinal amostrado e, a partir desses coeficientes, o valor RMS de cada um deles, conforme as equações 32 e 33.

$$D_{j}(i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n}^{N} d_{j,n}^{2}(i)}$$
(32)

$$A_{j}(i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n}^{N} a_{j,n}^{2}(i)}$$
(33)

Os autores propõem então que, inicialmente, seja utilizado A_j para verificar se o valor é suficiente para o envio de um sinal de abertura do sistema (*trip*). Esse valor é comparado com ajustes pré-estabelecidos e, caso seu valor seja inferior ao mesmo, o algoritmo proposto compara o valor RMS do d_3 da corrente residual com um novo ajuste pré-estabelecido e com o valor RMS do d_3 da corrente de linha multiplicado por um fator definido. Caso os dois critérios sejam atendidos, um alarme de detecção de falta de alta impedância é emitido. Conforme dados apresentados pelos autores, referentes às simulações executadas no EMTP/ATP, o algoritmo mostrou-se propício para a detecção de faltas de alta impedância.

A aplicação de outras famílias de Transformadas *Wavelets*, para extração de informações e utilização na detecção de faltas de alta impedância também foi estudada. A Transformada *Wavelet* mãe *Morlet* em sua forma contínua foi utilizada para a detecção da defasagem existente entre a corrente $3I_0$ e a tensão remanescente $3V_0$ (MICHALIK & BELKA, 2004). Segundo o estudo apresentado, durante o transitório de falta, os coeficientes *Wavelet* relacionados à $3I_0$ das fases sãs, e em falta, estão em oposição. Já os coeficientes *Wavelets* da tensão remanescente $3V_0$ estão localizados entre os de corrente, nunca excedendo 90º defasado da corrente de falta, e 90º adiantado da corrente nos alimentadores sãos. O método proposto foi avaliado em cerca de cem casos com variados tipos de rede. De todas as topologias, apenas nos sistemas aterrados com resistência, o índice de detecção correto não foi satisfatório ficando em cerca de 70%. Para as demais topologias, destacaram-se os resultados para as isoladas e compensadas com índices de 100%.

Além dos trabalhos descritos com foco principal na detecção de faltas de alta impedância com utilização da Transformada *Wavelet*, destacam-se ainda alguns trabalhos atuais que se utilizam de técnicas recentes com resultados promissores. Em Siadatan et al. (2010), a detecção de uma FAI tem como base a teoria do caos. Essa detecção ocorre a partir da mudança de estado de um sistema com a utilização de um oscilador *duffing*.

Outro método tem como base a análise a partir do gradiente morfológico multi-escala utilizando um PMC (Sarlak & Shahrtash, 2011). Nesse trabalho há uma comparação entre diversos métodos de detecção de uma FAI, utilizando Transformadas *Wavelets*, Transformadas Discretas de Fourier e Transformadas S-Discreta, sendo que o melhor grau de assertividade foi obtido pelo método proposto. Por último, a utilização de um Sistema de Inferência *Neuro-Fuzzy* Adaptativo (ANFIS, do inglês *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) tendo como dados de entrada a magnitude e ângulo de corrente da fundamental e terceira harmônica é avaliada por Aziz et al. (2011), também com resultados promissores.

5.3 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

A localização de faltas é um assunto de grande importância tendo em vista o impacto nos índices de continuidade do fornecimento da energia elétrica da concessionária e a respectiva redução na indisponibilidade do sistema elétrico. Isso ocorre, pois, com o conhecimento correto do local da falta, a concessionária pode recompor os trechos sãos com rapidez, isolando o ponto sob falta e, além disso, direcionar as equipes de manutenção para verificação dos defeitos intermitentes ou permanentes na rede de distribuição (MORALES-ESPANA et al., 2009).

A maioria dos métodos propostos de localização de falta tem como foco principal sistemas de transmissão. Isso se deve a importância dos mesmos e ao fato de sua implementação ser mais fácil, tendo em vista o fato de a mesma ser homogênea, ou seja, em grande parte, ou na totalidade de sua extensão, com um único tipo de condutor e dificilmente possuir grande maleabilidade e ramificações.

Em Takagi et al. (1982), um dos primeiros algoritmos para localização de faltas em linha de transmissão é proposto. Esse método baseia-se na medição de tensão e corrente em um único terminal sendo filtradas através da Transformada Discreta de *Fourier* (TDF) de forma a obter os fasores do sistema em análise. Além disso, o método se utiliza do teorema da superposição de forma a concluir que o sistema pós-falta é resultado de um sistema pré-falta em adição a um sistema puramente faltoso. De forma a melhor visualizar a proposição, consideramos estes sistemas como os circuitos apresentados na Figura 29.



Figura 29 – Sistema de análise proposto por Takagi et al. (1982): a) sistema pré-falta, b) sistema puramente faltoso e c) sistema sob falta.

Considerando que V'_F é a tensão no ponto de falta e I'_F a corrente de falta sob a resistência de falta R_F , tem-se:

$$V'_F = R_F I'_F \tag{34}$$

$$V'_F = -R_F (I''_{FS} + I''_{FR})$$
(35)

Sendo que $I_{FS}^{\prime\prime}$ e $I_{FR}^{\prime\prime}$ são definidos para o sistema puramente faltoso

e representam o sentido da corrente de falta em referência ao terminal de origem R ou S. Com isso, pode-se definir uma nova variável chamada K(d), dada em função da distância d entre o terminal S e o local da falta, sendo definida como:

$$K(d) \cong \frac{I_{FR}^{\prime\prime}}{I_{FS}^{\prime\prime}} \tag{36}$$

Utilizando esse dado na equação 35, tem-se a seguinte relação:

$$V'_F = R_F I''_{FS} (1 + K(d)) \tag{37}$$

Através da análise por quadripólos é possível obter as equações referentes a V'_F e I''_{FS} conforme segue:

$$V'_{F} = A(d)V'_{S} - B(d)I'_{S}$$
(38)

$$I_{FS}'' = C(d)V_S'' - D(d)I_S''$$
(39)

Sendo que os parâmetros do quadripólo são determinados conforme a seguir, onde λ indica a constante de propagação na linha e Z_c , a impedância característica da mesma:

$$A(d) = D(d) = \cosh(d) \tag{40}$$

$$B(d) = Z_c senh(\lambda d) \tag{41}$$

$$C(d) = \frac{\operatorname{senh}(\lambda d)}{Z_C}$$
(42)

Para a determinação dos vetores de tensão e corrente do sistema puramente faltoso, V_S'' e I_S'' , pode-se considerar a subtração dos mesmos em pré e pós-falta conforme mostrado a seguir:

$$V_S^{\prime\prime} \cong V_S^{\prime} - V_S \tag{43}$$

$$I_S^{\prime\prime} \cong I_S^{\prime} - I_S \tag{44}$$

Aplicando essas definições na equação 37 e reescrevendo a mesma é possível chegar à relação mostrada a seguir:

$$R_F(1+K(d)) = -\frac{A(d)V'_S - B(d)I'_S}{C(d)V''_S - D(d)I''_S}$$
(45)

Segundo os autores, pode-se considerar a impedância de falta puramente resistiva, e considerando que a linha de transmissão e as impedâncias das fontes sejam sem perdas, tem-se que o lado direito da equação terá um valor real. Dessa forma, pode-se definir a equação do localizador de faltas proposto como sendo:

$$Imag\left[\frac{A(d)V_{S}' - B(d)I_{S}'}{C(d)V_{S}'' - D(d)I_{S}''}\right] = 0$$
(46)

Dessa forma, apenas o elemento complexo da variável será analisado. Para a resolução dessa equação é necessário utilizar a técnica conhecida como *Newton-Raphson*, obtendo assim a distância *d* em função apenas dos dados medidos no terminal do alimentador em questão, não sendo necessários nenhum dado do local do evento. Vale ressaltar ainda que a partir dessa equação, e do diagrama de sequências de cada tipo de falta, pode-se obter as relações para faltas monofásicas, bifásicas e bifásica-terra, respectivamente, conforme mostradas nas equações 47, 48 e 49 a seguir.

$$Imag\left[\frac{V_{F}^{\prime(0)} + V_{F}^{\prime(1)} + V_{F}^{\prime(2)}}{C(d)^{(1)}V_{S}^{\prime\prime(1)} - D(d)^{(1)}I_{S}^{\prime\prime(1)}}\right] = 0$$
(47)

$$Imag\left[\frac{V_{F}^{\prime(1)} - V_{F}^{\prime(2)}}{C(d)^{(1)}V_{S}^{\prime\prime(1)} - D(d)^{(1)}I_{S}^{\prime\prime(1)}}\right] = 0$$
(48)

$$Imag\left[\frac{V_{F}^{\prime(1)} - V_{F}^{\prime(0)}}{C(d)^{(0)}V_{S}^{\prime\prime(0)} - D(d)^{(0)}I_{S}^{\prime\prime(0)}}\right] = 0$$
(49)

Outro método para localização de faltas em linhas de transmissão é apresentado em Coury et al. (2007), sendo que nesse caso, são utilizados os dados de dois terminais. Esse método tem como grande desafio a sincronização dos dados entre os terminais de forma a obter em ambos, os vetores de tensão e corrente de antes e após o defeito.

Para análise do equacionamento proposto pelo método, tem-se o mesmo sistema mostrado anteriormente na Figura 29. Considerando que os fasores de tensão e de corrente nos terminais *R* e *S* estão sincronizados, tem-se:

$$V_S' = V_F' + dZ_{abc} I_S' \tag{50}$$

$$V'_{R} = V'_{F} + (L - d)Z_{abc}I'_{R}$$
(51)

Sendo que *L* indica o comprimento total da linha de transmissão e Z_{abc} , a matriz de impedância série da linha. Reescrevendo essas relações de forma conjunta, tem-se:

$$V'_{S} - V'_{R} + LZ_{abc}I'_{R} = dZ_{abc}[I'_{S} + I'_{R}]$$
(52)

Considerando que:

$$Y_{Sj} = V'_{Sj} - V'_{Rj} + L \sum_{j=a,b,c} Z_{ji} I'_{Ri}$$
(53)

e,

$$M_{j} = \sum_{j=a,b,c} Z_{ji} (I'_{Si} + I'_{Ri})$$
(54)

pode-se reescrever a equação 52 da forma a seguir:

62

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} d$$
 (55)

Dessa forma, é possível obter o valor da distância d através da relação a seguir, onde M^+ indica a matriz transposta conjugada de M.

$$d = (M^+ M)^{-1} M^+ Y (56)$$

Pode ser visto que o método proposto não depende do tipo de falta, ao contrário do proposto por Takagi et al. (1982), e nem da impedância de falta.

Nesse mesmo trabalho, ainda é comparado o desempenho dos dois métodos em um sistema com dois terminais com geradores de 20 GVA e 5 GVA, respectivamente, com tensão de operação de 400 kV e uma linha de transmissão de 200 km de extensão. Foram testados diversos tipos de faltas em diversas localizações da mesma, além de variações referentes à impedância de falta e potência das fontes geradoras. Os erros verificados no primeiro método analisado foram maiores que no método com dados com dois terminais. No entanto, esses valores não invalidam sua aplicação. Ressalvas se fazem para faltas com resistências mais altas entre 100 Ω e 150 Ω , onde o método com dados de um único terminal mostrou um desempenho extremamente ruim, impossibilitando uma detecção correta do local da falta.

Ainda em Coury et al. (2007), um método para localização de faltas em linhas com três terminais é apresentada. No sistema em análise, foram verificados erros menores que 2% na maioria dos casos, sendo a maior parte da localização errônea apontada nas proximidades do barramento. Além disso, para impedâncias de falta de até 500 Ω , os resultados apresentados com relação à distância foram considerados bastante precisos. Vale ressaltar que assim como no método utilizando dados de dois terminais, os autores comentam a respeito do fato de haver necessidade de existir um canal de comunicação de dados para o envio de informação dos terminais remotos.

Os métodos discutidos até o momento, conforme descrito anteriormente, focam na localização de faltas em linhas de transmissão. As dificuldades relativas à localização de faltas em linhas de distribuição estão relacionadas principalmente aos seguintes aspectos (COSER et al, 2005):

63

- As linhas de distribuição são curtas, não transpostas, com diversas cargas ligadas e com derivações laterais que podem ser monofásicas, bifásicas ou trifásicas;
- As cargas tendem a ser desequilibradas;
- Os alimentadores não possuem configuração permanente, podendo estar com alterações de configuração e sempre sujeitos a expansões para novos consumidores;
- Normalmente existem apenas sistemas de medição na subestação.

Em função disso, métodos de localização mostram-se bem complexos, pois precisam trabalhar com todas as variáveis envolvidas.

Apesar dessas dificuldades, métodos de localização de faltas em linhas de distribuição tem sido propostos como em Lee et al. (2004). Para melhor entendimento desse método, deve-se considerar uma falta fase-terra na fase *A* conforme mostrado na Figura 30.

A tensão na barra *S* representada pode ser determinada pela seguinte relação:

$$V_{Sa} = x(Z_{La}I_{Sa}) + I_F R_F$$
(57)

Reescrevendo a equação e multiplicando por I_F^* , onde \star indica o conjugado da grandeza, ambos os lados, pode-se obter o seguinte:

$$I_F^* I_F R_F = I_F^* (V_{Sa} - x Z_{La} I_{Sa})$$
(58)



Figura 30 – Sistema de análise proposto por Lee et al. (2004) para uma falta faseterra (Fonte: FLAUZINO, 2007).

Com isso, tem-se que o lado esquerdo da equação é um número real e, de forma análoga ao método proposto por Takagi et al. (1982), pode-se obter a distância x da seguinte forma:

$$x = \frac{Imag(I_F^* V_{Sa})}{Imag(Z_{La} I_{Sa} I_F^*)}$$
(59)

Sendo que nessa relação, tem-se que:

$$I_F = I_{Sa} - I_{La} \tag{60}$$

No entanto, devido às características dos alimentadores em linhas de distribuição, ou seja, a existência de cargas ao longo de toda sua extensão, torna-se incorreto afirmar que a corrente de carga durante a ocorrência da falta (I_{La}) é igual a corrente de carga de pré-falta (I_{Sa}). Isso se deve ao fato de ocorrer uma queda de tensão quando da ocorrência da falta, acarretando em uma alteração na corrente de carga no ponto a jusante da mesma. Dessa forma, deve-se considerar que I_{La} é também uma incógnita no sistema e deve ser determinada. Sendo assim, no mesmo trabalho é proposto um método iterativo para a determinação da corrente I_{La} .

Inicialmente, assume-se que I_{La} é igual a corrente de carga. Com isso, calcula-se a corrente de falta I_F através da equação 60, e estima-se a localização da falta através da equação 59. Após isso, calcula-se a tensão no ponto de falta conforme a seguir.

$$\begin{pmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{pmatrix} - x \begin{pmatrix} Z_{La}I_{Sa} \\ Z_{Lb}I_{Sb} \\ Z_{Lc}I_{Sc} \end{pmatrix}$$
(61)

Com esses valores, deve-se obter o valor da corrente I_{La} através do valor da tensão de falta. O cálculo desse valor pode ser através da consideração de uma carga com impedância constante e partindo de duas situações:

 Se o valor da impedância de carga é conhecido, a determinação de I_{La} é da seguinte maneira:

$$I_{La} = Y_{La} V_{Fa} \tag{62}$$

Sendo que a matriz de admitância referente ao ponto após a falta, pode ser obtida da seguinte maneira:

$$Y_{La} = ((1 - x)Z_{La} + Z_R)^{-1}$$
(63)

Caso a impedância não seja conhecida, a determinação de I_{La} é da seguinte maneira:

$$I_{La} = \frac{I'_{La}}{V'_{Fa}} V_{Fa} \tag{64}$$

Sendo que os valores de I'_{La} e V'_{Sa} são, respectivamente, os valores medidos em S de corrente e tensão de pré-falta. Já o valor da tensão de pré-falta no local da mesma é obtido através da seguinte relação:

$$V'_{Fa} = V'_{Sa} - xZ_{La}I'_{La}$$
(65)

Um aspecto importante desse método proposto é quando o valor da

distância x calculada é maior que a extensão do ponto do trecho considerado. Dessa forma, é possível inferir que a falta ocorreu em um ponto à frente do trecho inicial em análise. Para verificação dos valores de corrente e tensão, deve-se utilizar as relações listadas a seguir. Nessas, o termo k indica a seção anterior e k + 1, a seção seguinte.

$$V_{k+1} = V_k - Z_k I_k (66)$$

$$I_{Lk} = Y_{Lk} V_k \tag{67}$$

$$I_k = I_{k-1} - I_{Lk} (68)$$

Nessas relações, Y_{Lk} indica a matriz de admitância da carga ligada na barra $k \in I_{Lk}$ a corrente de carga na mesma. Dessa forma, podem-se obter os valores de tensão e corrente em cada barra do sistema de distribuição. Caso o valor encontrado de x esteja no intervalo entre as seções em análise, basta somar este com os valores anteriores para determinação do local da falta.

Um dos problemas citados anteriormente na localização de faltas em sistemas de distribuição refere-se ao fato do mesmo possuir várias derivações laterais partindo do tronco do alimentador principal. Dessa forma, um mesmo nível de curto-circuito pode estar presente em diversos pontos do sistema. Ainda no trabalho proposto por Lee et al. (2004), para determinação da lateral de ocorrência da falta são utilizados dados referentes a forma de onda de corrente na subestação. Dessa forma, pode-se determinar qual dispositivo de proteção atuou e, em conjunto com o montante de carga interrompida, determinar o ramal da ocorrência da falta.

Em Coser et al. (2005), um método de localização de faltas foi proposto com bons resultados considerando valores de impedância de falta de até 350 Ω . Esse método se utiliza de redes neurais artificiais para a determinação do local da falta por uma técnica chamada de *Modular Neural Network Architecture for Fault Location*. Basicamente, esse método se utiliza dos fasores de tensão e corrente nos instantes de pré-falta, durante a falta e pós-falta. Inicialmente, a corrente de cada fase é monitorada. Caso a mesma exceda em 50% a corrente de pré-falta e o sistema de proteção extinga a mesma, o algoritmo de localização de falta é iniciado. Após isso, e tendo em vista o aspecto que o sistema possui conhecimento a respeito do fluxo de potência de cada ramal, é verificado o total de

carga retirado de operação e comparado com as cargas de cada uma das seções do alimentador que possuam sistema de proteção (elo fusível, religadores, etc.). Com a determinação do possível ramal, uma rede neural associada ao mesmo é utilizada para determinação da distância da falta.

Outros trabalhos utilizando medições de corrente e tensão no terminal da linha, tais como Das et al. (2000) e Saha et al. (2001) obtiveram bons resultados. Em Saha et al. (2002), os resultados desses algoritmos foram comparados e verificou-se que métodos mais complexos, como os propostos por Das et al. (2000) e Saha et al. (2001), possuem maior acurácia. No entanto, necessitam de maior quantidade de informações da rede em análise.

Outros trabalhos importantes na área, tendo como base a estimação dos valores de corrente e tensão em cada nó, foram apresentados por Girgis et al. (1993) e Zhu et al. (1997).

5.3.1 Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição

A localização de faltas em sistemas de distribuição de energia, conforme descrito anteriormente, é um problema complexo devido às características inerentes de sua topologia e constituição. Quando da ocorrência de faltas de alta impedância, essa complexidade é ainda maior, tendo em vista a própria dificuldade de se detectar esse tipo de ocorrência.

Em Flauzino (2007), um método para localização de faltas de alta impedância foi proposto tendo como base a decomposição das variáveis em componentes ortogonais em conjunto com um sistema de inferência *fuzzy* para localização e determinação da resistência de falta. Segundo o autor, os resultados obtidos possibilitaram comprovar que além da distância da ocorrência da falta, é possível estimar a resistência da mesma.

Outro método para localização de faltas de alta impedância foi proposto por Moreto (2005). Nesse trabalho, o autor propõe a utilização da amplitude do componente harmônico de terceira ordem da corrente em conjunto com as diferenças entre os ângulos das representações dos componentes harmônicos de terceira ordem de corrente e da componente fundamental da tensão. Esses dados são extraídos através do algoritmo proposto por Lin & Liu (2002) para eliminação do componente contínuo, através dos dados oscilografados pelos relés instalados nas subestações. Pelos resultados apresentados no trabalho em questão, o erro médio na localização de faltas de alta impedância no método proposto foi abaixo de 5% do percentual total do comprimento da linha. Esse resultado mostrou-se superior em comparação ao apresentado no mesmo estudo para os algoritmos propostos por Takagi et al. (1982) e Lee et al. (2004).

Em Ali et al.(2012), é proposto um método de localização de faltas de alta impedância em um sistema de distribuição radial utilizando a Transformada *Wavelet*. O método proposto toma como base os detalhes, obtidos através da *Wavelet* mãe *Daubechies* 4 de primeira, segunda e terceira ordem do sinal de tensão medido no barramento da subestação. Esses dados são calculados para as três fases para dois ciclos pós-evento. Dessa forma, são obtidos 18 valores para cada nó.

Para análise da proposta, um sistema de distribuição de 38 nós é modelado e são simuladas as faltas com impedâncias de 60, 70, 80, 90 e 100 ohms por dois ciclos. Com esses dados, um coeficiente médio entre dois nós é proposto conforme abaixo:

$$A_V = \frac{\left(\sum d_i + \sum d_j\right)}{2} \tag{69}$$

Dessa forma, são gerados cinco bancos de dados, um para cada impedância de falta simulada, onde para cada item, há dezoito dados referentes a média calculada dos detalhes de primeira, segunda e terceira ordem de cada fase de cada um dos dois ciclos considerados.

Baseado nesse banco de dados, quando há a detecção de uma falta de alta impedância, o algoritmo proposto, através da Transformada W*avelet* do sinal, calcula os detalhes de primeira, segunda e terceira ordem da onda de tensão de cada fase em dois ciclos. Dessa forma, é calculada a média da diferença absoluta destes para cada um dos elementos de cada banco de dados, conforme mostrado a seguir, onde n indica o número de dados, no caso, dezoito.

$$AAD = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| \sum d_{i(medido)} - A_{V} \right|}{n}$$
(70)

A partir desses dados, é criado um *ranking*, indicando desde a seção com menor diferença encontrada, até a de maior diferença. Nos resultados apresentados, os autores mostram que a seção em falta estava sempre entre as duas melhores colocadas no *ranking*.

Em Dwivedi et al. (2008), um método de localização de falta de alta impedância utilizando os detalhes de terceira ordem obtidos através da *Wavelet* mãe *Daubechies* 4 dos sinais de corrente das três fases é apresentado. Esse nível de detalhe é proposto tendo em vista a banda de frequência ser entre 60 Hz e 200 Hz. Dessa forma, há uma redução dos ruídos de alta frequência e, nessa banda, estão os harmônicos de segunda e terceira ordem que são predominantes em situações de faltas.

Nesse trabalho, os autores propõem a somatória dos coeficientes de terceira ordem da corrente de cada fase conforme mostrado a seguir, onde *N* indica a quantidade de amostras.

$$T_{a,b,c} = \sum_{k=1}^{N} d_3(k)$$
(71)

A partir disso, o valor encontrado é comparado com uma tabela existente para o tipo de falta e para cada linha do sistema elétrico. Dessa forma, a linha onde a menor diferença foi verificada é considerada como local da falta.

Para a validação foram modelados dois sistemas com sete e dezenove nós e simuladas faltas de 0,001 Ω até 200 Ω . Segundo os autores, o nível de acerto foi alto. Apenas para faltas com impedância de 200 Ω na última seção do sistema proposto é que o método não foi efetivo.

5.4 COMENTÁRIOS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em toda a revisão bibliográfica realizada pode-se verificar a complexidade do problema relacionado à detecção e localização de faltas de alta impedância, reforçando o aspecto do tema ainda permanecer em aberto.

Dentre as técnicas e métodos apresentados, destacam-se os resultados obtidos com a utilização de RNAs. Além disso, as características extraídas através de Transformadas *Wavelets* mostraram-se também de grande valia quando utilizadas em conjunto com técnicas inteligentes.

Para a elaboração do método proposto nessa dissertação, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Emanuel *et al.* (1990) e Nakagomi (2006) na modelagem de FAIs; Mokhtari & Aghatehrani (2005), Yang *et al.* (2004), Elkalashy *et al.* (2007a, 2007b, 2007c) e Garcia & Paredes no desenvolvimento dos módulos referentes a detecção da descontinuidade e da ocorrência de uma FAI; e Moreto (2005) para a localização da mesma.

Baseado nisso, entende-se ser de grande importância para o trabalho, a análise e utilização dessas ferramentas para um possível encaminhamento do problema no contexto apresentado.

6 MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO: A ORIGEM DAS PRINCIPAIS SITUAÇÕES DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA E DOS TRANSITÓRIOS EM ANÁLISE

Para possibilitar a análise da metodologia a ser proposta para a detecção e localização de faltas de alta impedância, faz-se necessária a modelagem de um sistema de distribuição tendo em vista a impossibilidade e a complexidade de testes em campo para esse fim. Dessa forma, um sistema de distribuição de uma concessionária do sul do país foi modelado e será apresentado nesse capítulo.

O sistema modelado é o apresentado na Figura 2, mostrado anteriormente, e que para o momento foi simplificado para a forma apresentada na Figura 31.

Nesse Capítulo, inicialmente é descrito o sistema de distribuição a ser analisado no trabalho como um todo. Na seção 5.1.1 o sistema é modelado no ATP/EMTP, e na seção 5.1.2 é feita a validação do mesmo tendo como base dados simulados e reais obtidos em campo sobre o sistema. Na seção 5.2 é descrito o modelo de FAI que será utilizado na simulação deste tipo de evento. Nas seções 5.3 e 5.4 são apresentadas as modelagens dos motores de indução e do forno a arco, respectivamente. Por último, na seção 5.5, o sistema de aquisição de dados de um relé digital é modelado dispondo da interface do *software* do ATPDraw (ATPDraw, 2012).

6.1 O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema modelado, conforme mostrado na Figura 31, é constituído de um alimentador (Alimentador 1) operando em 34,5 kV partindo de uma subestação de 138/34,5/13,8 kV, com um transformador de 41,67 MVA com ligações no primário e secundário em estrela aterrado e delta no terciário. Esse alimentador possui 19 quilômetros de extensão e é composto por um cabo de alumínio com alma de aço com bitola 4/0, atendendo outras duas subestações de 34,5/13,8 kV. Vale ressaltar que há no barramento de 34,5 kV ainda 4 alimentadores que não serão alvos desse estudo.



Figura 31 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição em análise.

A subestação *B* possui um transformador de 2,8 MVA com o primário em estrela aterrado e o secundário em delta. Este transformador alimenta dois circuitos, em 13,8 kV, com carga distribuída ao longo de sua extensão, representados pelos alimentadores 2 e 3. Na barra de 34,5 kV que alimenta o referido transformador, existem outros dois alimentadores. O primeiro deles, alimentador 4, atende apenas a carga distribuída ao longo de sua extensão de 13 quilômetros com cabo de bitola 2/0-CAA com alma de aço. Já o alimentador 5, é a principal fonte de atendimento da subestação *C*, e possui 11 quilômetros de extensão com cabo de alma de aço com bitola 2/0.

Na subestação *C* existe um transformador de 34,5/13,8 kV e 2,8 MVA com ligação no primário em estrela aterrado e no secundário em delta. Este transformador atende dois alimentadores de 13,8 kV com carga distribuída ao longo de suas extensões, os alimentadores 6 e 7. Já na barra de 34,5 kV da referida subestação, existe ainda o alimentador 8 com 23 quilômetros de extensão com cabo de alma de aço com bitola 2/0. Importante salientar que devido ao interesse de apenas analisar a interferência de transitórios nos alimentadores 2, 3, 6 e 7 no desempenho do algoritmo a ser proposto, os mesmos tiveram apenas sua extensão inicial modeladas com carga distribuída em seus ramais. O restante da carga foi considerado de forma concentrada no final do trecho modelado.

As cargas médias de cada alimentador foram obtidas através de dados reais medidos e da análise de demandas no banco de dados da concessionária. Esses valores são mostrados na Tabela 4.

Um último aspecto importante do sistema de distribuição refere-se aos bancos de capacitores existentes no mesmo. Na subestação *B* há um banco de 300 kVAr, um de 200 kVAr e um de 100 kVAr. Já na subestação *C*, há um banco de 100 kVAr, um de 300 kVAr e um de 600 kVAr.

6.1.1 Modelagem do SD no ATP/EMTP

Para a modelagem do SD é necessário inicialmente estabelecer a impedância equivalente do sistema equivalente da geração até o ponto de conexão do transformador na SE *A*. Esses dados foram obtidos do banco de dados da concessionária através da modelagem existente no *software* ANAFAS (ANAFAS,

2009). Esses dados são mostrados na Tabela 5.

Tab <u>ela 4 – Correntes médias nos alimentado</u> res.							
Alimentador	Corrente (A)						
Alimentador 1	65						
Alimentador 2	24						
Alimentador 3	55						
Alimentador 4	2,5						
Alimentador 5	36						
Alimentador 6	40						
Alimentador 7	34						
Alimentador 8	3						

Tabela 5 – Impedâncias equivalentes do sistema de geração.

Componente	Valor (Ω)
R_0	0,735
R_1	1,1205
X_0	5,7167
X1	6,4954

Os transformadores foram modelados utilizando-se do componente SATTRAFO do ATP (ATPDraw, 2012). Para o transformador da SE A, os valores foram obtidos tendo como base os dados de placa do mesmo. Estes são apresentados na Tabela 6. Com esses dados foi possível determinar a reatância em cada enrolamento. Para a determinação da resistência de cada enrolamento foi utilizada a norma IEEE C37.010-1999 (IEEE, 2000), onde a relação $X/_R$ de um transformador de 41,67 MVA é aproximadamente 26. Esses valores são mostrados na Tabela 7.

Tabela 6 – Dados de placa do ensaio de curto-circuito do transformador da SE A.

Impedâncias de cur	to-circuito (%)
Z _{PS}	12,33
Z_{ST}	5,58
Z_{PT}	20,02

Enrolamento	Impedância (Ω)	Reatância (Ω)
Primário	3,7764	98,1852
Secundário	0,0186	-0,4837
Terciário	0,0187	0,4867

Tabela 7 – Valores de impedância e reatâncias obtidos para o transformador da SE *A*.

Para os transformadores de potência e de aterramento das subestações *B* e *C*, os dados de ensaio não estavam disponíveis. Dessa forma foram considerados os valores utilizados pela concessionária em seu sistema modelado no ANAFAS considerando que os valores de reatância estão divididos igualmente nos dois enrolamentos. A Tabela 8 mostra os valores utilizados.

Tabela 8 – Reatâncias do primário e secundário dos transformadores das SEs B e C.

Transformador	Subestação	Tipo da ligação	Reatância do primário (Ω)	Reatância do secundário (Ω)
Potência	В	Y(aterrado)- Delta	9,94	4,77
Aterramento	В	ZigZag	16,79	16,79
Potência	С	Y(aterrado)- Delta	6,90	3,31
Aterramento	С	ZigZag	16,66	16,66

Nos alimentadores, a modelagem se baseia nos valores das impedâncias e reatâncias de sequências zero e positiva do condutor utilizado no mesmo. No sistema em análise, são utilizados condutores de alumínio, com e sem alma de aço, com bitola 4/0, 2/0 e 02 AWG. Os valores utilizados pela concessionária em suas análises são mostrados na Tabela 9. Para a modelagem dos mesmos no ATP, foi utilizado o componente LINESY_3 (ATPDraw, 2012).

Com relação à carga ligada em cada alimentador, considerou-se um fator de potência de 0,92 indutivo para o cálculo dos valores de reatância e resistência a serem ligados em cada ponto dos alimentadores. Vale ressaltar que as cargas nos alimentadores 4, 5 e 8 foram consideradas de forma concentradas em pontos praticamente equidistantes. Já nos alimentadores 2, 3, 6 e 7, foram modelados os principais ramais com a carga concentrada no final de cada um deles.

A Tabela 10 indica todos os valores inseridos no ATP.

Condutor	R ₀ (Ω/km)	X ₀ (Ω/km)	R₁ (Ω/km)	$L_1 (\Omega/km)$
02-CA	1,14113	1,88978	0,96338	0,44828
2/0-CAA	0,73395	1,95771	0,55620	0,51621
4/0-CAA	0,53565	1,92040	0,35790	0,47890

Tabela 9 – Impedâncias e reatâncias de sequência zero e positiva para os condutores 02-CA, 2/0-CAA e 4/0-CAA.

Por último, foram modelados os bancos de capacitores nas subestações *B* e *C*. Na Tabela 11 são mostrados os valores considerados.

6.1.2 Validação da Modelagem

Para comprovar a eficácia da modelagem realizada, foram analisados os dados de corrente para regime permanente e de faltas simuladas nos alimentadores, confrontando-os com os dados reais e simulados nos sistemas da concessionária. Além disso, uma comparação foi realizada entre os dados oscilografados de uma falta real em um ponto conhecido e a simulação da mesma no sistema modelado.

Primeiramente, foram obtidas as correntes simuladas de carga em regime permanente. Como podem ser observados na Tabela 12, os valores foram bem próximos dos reais mostrados anteriormente na Tabela 4. As diferenças decorrem da própria incerteza dos dados medidos e da média realizada para a obtenção dos valores, em conjunto ao fato de a análise não levar em consideração um horário específico. Dessa forma, as diferenças são esperadas, pois a ocorrência do valor médio de corrente de um alimentador em determinado horário pode não estar em alinhamento com o horário de ocorrência da corrente média de outro alimentador. Essa diferença é maior ainda no Alimentador 1, tendo em vista que toda a carga do sistema em análise passa por ele.

Alimentador	Trecho	Condutor	Tamanho do Trecho (km)	R(Ω)	Χ(Ω)
	1	02-CA	0,950	2.534	1.079
2	2	02-CA	0,450	5.115	2.179
	3	02-CA	0,530	2.059	877
	1	02-CA	0,566	1.583	674
	2	02-CA	0,700	2.870	1.222
3	3	02-CA	0,380	-	-
	4	02-CA	0,580	2.701	1.151
	5	02-CA	0,050	866	369
	1	2/0-CAA	5,000	22.536	9.600
4	2	2/0-CAA	5,000	22.536	9.600
	3	2/0-CAA	5,300	22.536	9.600
	1	2/0-CAA	3,000	13.915	5.928
5	2	2/0-CAA	4,000	13.915	5.928
	3	2/0-CAA	4,000	13.915	5.928
	1	02-CA	0,286	6.040	2.573
6	2	02-01	0.286	895	381
	2	02-0A	0,200	2.265	964
	1	02-CA	0,920	9.690	4.128
7	2		0.020	9.690	4.128
	2	02-CA	0,920	745	317
	1	2/0-CAA	7,000	16.934	7.214
8	2	2/0-CAA	8,000	16.934	7.214
	3	2/0-CAA	8,000	16.934	7.214

Tabela 10 – Impedâncias e reatâncias de carga de cada alimentador.

Tabela 11 – Capacitâncias para simulação dos bancos de capacitores.

Banco Capacitor	Capacitância
100 kVAr	0,22286 µF
200 kVAr	0,44572 µF
300 kVAr	0,66857 µF
600 kVAr	1,3371 µF

Corrente (A)	Diferença (%)
73,00	+12,3%
23,40	-2,5%
54,40	-1,1%
2,32	-7,2%
38,00	+5,55%
38,05	-4,87%
34,00	0%
3,04	+1,33%
	Corrente (A) 73,00 23,40 54,40 2,32 38,00 38,05 34,00 3,04

Tabela 12 - Correntes simuladas nos alimentadores do sistema modelado.

Para a análise do sistema sob falta, foram simuladas faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas em todos os alimentadores de 34,5 kV, com o local de ocorrência variando entre os valores de 0%, 50% e 100% da extensão do mesmo. Esses valores foram então comparados com os valores simulados no *software* ANAFAS utilizado pela concessionária. Os valores e diferenças são mostrados nas Tabelas 13, 14 e 15.

Alimentador	Percentual	ANAFAS			ATP			Diferença no ATP em função do ANAFAS		
	da Linha (%)	l _a	I _b	I _c	l _a	I _b	I _c	l _a	I _b	I _c
	0	3134	3134	3134	3282	3282	3282	4,72%	4,72%	4,72%
1	50	1736	1736	1736	1775	1775	1775	2,25%	2,25%	2,25%
	100	1175	1175	1175	1190	1190	1190	1,28%	1,28%	1,28%
	0	1175	1175	1175	1189	1189	1189	1,19%	1,19%	1,19%
4	50	888	888	888	896	896	896	0,90%	0,90%	0,90%
	100	710	710	710	715	715	715	0,70%	0,70%	0,70%
	0	1175	1175	1175	1189	1189	1189	1,19%	1,19%	1,19%
5	50	954	954	954	963	963	963	0,94%	0,94%	0,94%
	100	801	801	801	807	807	807	0,75%	0,75%	0,75%
	0	801	801	801	807	807	807	0,75%	0,75%	0,75%
8	50	596	596	596	600	600	600	0,67%	0,67%	0,67%
	100	473	473	473	476	476	476	0.63%	0.63%	0.63%

Tabela 13 – Correntes simuladas no ATP e ANAFAS para faltas trifásicas.

	Percentual		ANAFAS			ATF)	Distorçã	Distorção ATP em função do ANAFAS		
Alimentador	da Linha (%)	l _a	I _b	I _c	l _a	I _b	I _c	l _a	I _b	I _c	
	0	0	2714	2714	0	2842	2842	0,00%	4,72%	4,72%	
1	50	0	1503	1503	0	1534	1534	0,00%	2,06%	2,06%	
	100	0	1017	1017	0	1030	1030	0,00%	1,28%	1,28%	
	0	0	1017	1017	0	1030	1030	0,00%	1,28%	1,28%	
4	50	0	769	769	0	775	775	0,00%	0,78%	0,78%	
	100	0	615	615	0	619	619	0,00%	0,65%	0,65%	
	0	0	1017	1017	0	1030	1030	0,00%	1,28%	1,28%	
5	50	0	826	826	0	834	834	0,00%	0,97%	0,97%	
	100	0	694	694	0	698	698	0,00%	0,58%	0,58%	
	0	0	694	694	0	698	698	0,00%	0,58%	0,58%	
8	50	0	516	516	0	519	519	0,00%	0,58%	0,58%	
	100	0	409	409	0	412	412	0,00%	0,73%	0,73%	

Tabela 14 – Correntes simuladas no ATP e ANAFAS para faltas bifásicas.

Analisando os resultados obtidos nessas simulações, é possível verificar que as maiores diferenças não chegaram a 5%.

As mesmas simulações foram realizadas nos alimentadores de 13,8 kV, apenas no início de cada linha, utilizando o *software* próprio da concessionária e a modelagem realizada no ATP. Os valores e erros são mostrados na Tabela 16. Conclui-se que os mesmos são satisfatórios tendo em vista o percentual de 2% observado.

Para validação do sistema tendo como base um evento real, utilizouse dos dados oscilografados de uma falta bifásica que ocorreu a 1,5 quilômetros da subestação *A* no Alimentador 1. Os gráficos de tensão e corrente obtidos pelo religador microprocessado instalado na subestação *A* são mostrados na Figura 32.

Alimentador	Percentual	A	ANAFAS			ATP		Distorçã	Distorção ATP em função do ANAFAS		
	da Linha (%)	l _a	l _b	I _c	l _a	l _b	I _c	l _a	I _b	I _c	
	0	4243	0	0	4327	0	0	1,98%	0,00%	0,00%	
1	50	1470	220	220	1475	213	213	0,34%	-3,18%	-3,18%	
	100	1032	347	347	1043	351	351	1,07%	1,15%	1,15%	
	0	1032	347	347	1043	351	351	1,07%	1,15%	1,15%	
4	50	640	215	215	639	210	210	-0,16%	-2,33%	-2,33%	
	100	462	155	155	467	151	151	1,08%	-2,58%	-2,58%	
	0	1032	347	347	1043	351	351	1,07%	1,15%	1,15%	
5	50	804	310	310	811	312	312	0,87%	0,65%	0,65%	
	100	707	309	309	712	311	311	0,71%	0,65%	0,65%	
	0	707	309	309	711	311	311	0,57%	0,65%	0,65%	
8	50	418	183	183	421	184	184	0,72%	0,55%	0,55%	
	100	296	129	129	298	130	130	0,68%	0,78%	0,78%	

Tabela 15 – Correntes simuladas no ATP e ANAFAS para faltas monofásicas.

Tabela 16 – Correntes simuladas no ATP e no sistema da concessionária para os alimentadores de 13,8 kV.

Alimentador	Percentual da Linha (%)	Sistema da Concessionária			ATP			Distorção ATP em função do sistema da concessionária		
		l _a	I _b	I _c	l _a	I _b	I _c	l _a	I _b	I _c
2	Trifásico	1321	1321	1321	1340	1340	1340	1,44%	1,44%	1,44%
	Bifásico	0	1144	1144	0	1160	1160	0,00%	1,40%	1,40%
	Monofásico	525	0	0	530	0	0	0,95%	0,00%	0,00%
3	Trifásico	1321	1321	1321	1340	1340	1340	1,44%	1,44%	1,44%
	Bifásico	0	1144	1144	0	1160	1160	0,00%	1,40%	1,40%
	Monofásico	525	0	0	530	0	0	0,95%	0,00%	0,00%
6	Trifásico	1276	1276	1276	1257	1257	1257	-1,49%	-1,49%	-1,49%
	Bifásico	0	1105	1105	0	1089	1089	0,00%	-1,45%	-1,45%
	Monofásico	528	0	0	537	0	0	1,70%	0,00%	0,00%
7	Trifásico	1276	1276	1276	1257	1257	1257	-1,49%	-1,49%	-1,49%
	Bifásico	0	1105	1105	0	1089	1089	0,00%	-1,45%	-1,45%
	Monofásico	528	0	0	537	0	0	1,70%	0,00%	0,00%

Analisando os gráficos, pode-se verificar que a falta é bifásica entre as fases *B* e *C*. Apesar da curva senoidal mostrada, deve-se ressaltar que a oscilografia mostra os valores em RMS, e que os TPs das fases *B* e *C* estavam invertidos na subestação. Os valores no instante da abertura do religador são mostrados na Tabela 17.

Grandeza	Valor
V _A	19.620 V
V_B	11.550 V
V_{C}	9.140 V
I _A	68 A
I _B	2.484 A
I _C	2.555 A

Tabela 17 – Grandezas verificadas na oscilografia do evento.



Figura 32 – Oscilografia da falta bifásica a 1,5 km da SE A.

Para efeitos de comparação, foi simulada uma falta bifásica no Alimentador 1 a uma distância de 1,5 quilômetros da subestação *A*. Nas Figuras 33 e 34 pode-se verificar os gráficos de tensão e corrente obtidos na simulação, em valores RMS, medidos no ponto equivalente a saída do Alimentador 1. Na Tabela 18 são mostrados os valores RMS de tensão e corrente obtidos, bem como o percentual de erro encontrado entre o evento real e o simulado.

Analisando os dados obtidos, verifica-se que o maior erro percentual ocorreu na corrente da fase sã, fase *A* com carga, o que pode ser explicado pelo fato de o modelo considerado tratar a carga como sendo um valor médio, o que pode divergir da carga no momento exato da ocorrência da falta. Para os demais valores, o erro percentual não ultrapassou 3,53%, sendo que no caso das correntes nas fases *B* e *C*, em falta, o erro foi menor que 1%.



Figura 33 – Correntes obtidas para uma falta bifásica a 1,5 km da SE A.

Com base em todas as simulações realizadas e nas comparações com dados reais, da concessionária e do modelo proposto, pode-se concluir que o SD modelado é bem similar com os modelos utilizados pela concessionária e, principalmente, com o evento oscilografado.


Figura 34 – Tensões obtidas para uma falta bifásica a 1,5 km da SE A.

Grandeza	Valor Real	Valor Simulado	Erro Percentual
V _A	19.620 V	19.700 V	-0,41%
V_B	11.550 V	11.142 V	3,53%
Vc	9.140 V	8.957 V	2,00%
I _A	68 A	73 A	-7,35%
I _B	2.484 A	2.498 A	-0,56%
I _C	2.555 A	2.559 A	-0,16%

Tabela 18 – Grandezas reais, simuladas e erro percentual.

6.2 MODELAGEM DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

A modelagem das faltas de alta impedância teve como base os trabalhos de Nakagomi (2006) e Emanuel et al. (1990). O modelo proposto é mostrado na Figura 35. Esse modelo é composto de dois diodos em oposição, de forma a ilustrar a tensão de extinção e reignição do arco elétrico. O modelo é caracterizado por V_N, que representa a tensão a partir da qual há condução no semiciclo negativo, e V_P, para o semiciclo positivo, e por duas resistências variáveis

que possuem uma curva tensão versus corrente (*VxI*) caracterizando a relação entre o semiciclo positivo e negativo.



Figura 35 – Modelo para faltas de alta impedância.

As curvas VxI para as resistências variáveis foram elaboradas tendo como base a curva característica em p.u. (por unidade) mostrada no trabalho de Nakagomi (2006). Tendo em vista a impossibilidade de considerar uma curva para a situação em que a tensão está crescendo, pois o componente NLINRES utilizado só permite a utilização de uma curva, partindo de seu menor valor negativo até seu máximo valor positivo, e outra para quando a tensão está decrescendo, quando sai de seu valor máximo em direção ao valor mínimo, considerou-se apenas a curva de subida. Essa curva é mostrada na Figura 36 e pode ser utilizada para qualquer valor de corrente a ser considerado e na tensão da linha onde a mesma é aplicada.

Dessa forma, para uma falta de alta impedância com corrente de magnitude de 20 A, o gráfico de corrente é mostrado na Figura 37. Pode-se verificar que suas formas estão coerentes com alguns exemplos expostos no Capítulo 4. É possível verificar as descontinuidades nos momentos da passagem por zero da corrente da forma esperada para uma corrente de falta de alta impedância. Um detalhe desse aspecto é apresentado na Figura 38.



Figura 36 – Curva Vx/ para utilização no modelo de faltas de alta impedância (Fonte: NAKAGOMI, 2006).



Figura 37 – Corrente de uma falta de alta impedância de amplitude de 20 A.



Figura 38 – Detalhe da descontinuidade da corrente na passagem pelo eixo X.

Um aspecto importante a ser citado é que, devido ao fato de o trabalho propor a detecção e localização de faltas de alta impedância em um curto período de tempo, as características da falta de alta impedância relacionados ao *buildup, shoulders* e intermitência, não foram considerados na modelagem mostrada.

6.3 MODELAGEM DOS MOTORES DE INDUÇÃO

Para possibilitar a análise do transitório referente à partida direta de motores de indução, foram considerados dois motores, um de 50 HP e outro de 75 HP. Esses motores foram selecionados tendo em vista sua potência relativamente considerável para um alimentador de distribuição e o fato de serem facilmente encontrados em pequenas indústrias. Os dados de cada um deles são mostrados nas Tabelas 19 e 20. Estes foram obtidos a partir de dados de placas de motores da fabricante WEG (WEG, 2013).

A partir desses dados e utilizando-se da topologia mostrada na Figura 39 para simulação de motores no ATP através do componente *UM_3*, devemse obter os valores do conjugado resistente e o momento de inércia do mesmo. A Tabela 21 mostra os valores encontrados através da utilização do *software* motdatpr.exe, sendo que os valores das quatro primeiras linhas são utilizados no componente UM_3. Importante ressaltar que a inserção do momento de inércia é considerada através da capacitância, e do conjugado resistente por resistência.

Característica	Valor
Frequência	60
Polos	4
Rotação Nominal	186,4 rad/s
Escorregamento	1,11%
Tensão Nominal	220/380 V
Corrente Nominal	126/72,7 A
I_p/I_n	7,4
Conjugado Nominal	199 Nm

Tabela 19 – Dados do motor de indução trifásico de 50 HP (WEG, 2013).



Figura 39 – Modelo no ATP para um motor trifásico (Fonte: Adaptado de ZAPPELINI, 2008).

Para a fonte de corrente de inicialização, o valor deve ser bem baixo, sendo utilizado nesse caso 10^{-5} A. Os demais resistores deverão ser de valores elevados, próximos a $10^{6} \Omega$.

,	
Característica	Valor
Frequência	60
Polos	4
Rotação Nominal	186,4 rad/s
Escorregamento	1,11%
Tensão Nominal	220/380 V
Corrente Nominal	182/105 A
I_p/I_n	7,7
Conjugado Nominal	295 Nm

Tabela 20 – Dados do motor de indução trifásico de 75 HP (WEG, 2013).

A partir desses dados, a partida direta dos motores foi simulada com carga nominal. A evolução do torque de cada motor pode ser vista nas Figuras 40 e 41, para o motor de 50 HP e 75 HP, respectivamente. Nas Figuras 42 e 43 a frequência de rotação é mostrada para cada motor. Como pode ser visto seus valores estão coerentes com os dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 21 – Dados calculados dos motores de indução trifásicos.

Característica	Motor 50 HP	Motor 75 HP
LMUD e LMUQ	0,014730 H	0,010816 H
$L_{d}, L_{q}, L_{1}, L_{2}$	0,000521 H	0,000344 H
R_d, R_q	0,085551 Ω	0,053244 Ω
R_1, R_2	0,037363 Ω	0,025176 Ω
Momento de Inércia	6,27141 kgm ²	9,17254 kgm ²
Conjugado Resistente	0,92638 Ω	0,62484 Ω

A Tabela 22 indica os valores obtidos na simulação para as correntes. Como podem ser observados, os mesmos estão bem próximos, validando a modelagem realizada. Na Figura 44 a corrente da fase *A* do motor de 50 HP é mostrada apenas para ilustrar sua curva característica.

Tabela 22 – Dados dos motores verificados na simulação.

Característica	Motor de 50 HP	Motor de 75 HP
Corrente Nominal	73,53 A	107,5 A
Rotação	186,40 rad/s	186,50 rad/s
Conjugado Nominal	201,19 N.m	296 N.m







Figura 42 – Frequência de rotação do motor de 50 HP.



Figura 43 – Frequência de rotação do motor de 75 HP.



Figura 44 – Corrente na fase A do motor de 50 HP.

6.4 MODELAGEM DO FORNO A ARCO

Em Garcia (2010), é implementado um modelo de um forno a arco proposto por Horton et al. (2009), utilizando um componente *MODELS* no ATP/EMTP e resistências variáveis (*TACS*). O esquemático desse modelo é mostrado na Figura 45.

Nesse modelo, considera-se a variação da resistência do arco elétrico de forma proporcional ao tamanho do arco. Dessa forma, R_{min} está relacionado ao menor tamanho do arco elétrico, e R_{max}, ao maior tamanho. Para possibilitar a característica de variabilidade do valor da resistência, um gerador de números aleatórios é utilizado no mesmo. Além disso, o sinal é multiplicado por uma

senóide de frequência e magnitude constante de forma a modular o sinal.



Figura 45 – Modelo proposto para simulação de um forno a arco (Fonte: HORTON, 2009).

Baseado nisso, o modelo foi implementado no ATP conforme mostrado na Figura 46, sendo a corrente de uma das fases obtidas na simulação mostrada na Figura 47.



Figura 46 – Forno a arco modelado no ATP.



Figura 47 – Correntes obtidas para o modelo do forno a arco.

6.5 MODELAGEM DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados de um relé microprocessado é formado pelos transdutores (TC – transformador de corrente e TP – transformador de potencial), filtro *anti-aliasing*, sistema de amostragem e conversor A/D. Cabe frisar que nesse trabalho, a modelagem do mesmo foi realizada totalmente no *software* ATP/EMTP, buscando uma maior aproximação com o sistema de aquisição de dados encontrado na prática.

6.5.1 Transformadores de Corrente (TC)

Os TCs são responsáveis pela transdução das correntes do sistema para valores menores e passíveis de utilização para monitoramento e controle pelos relés. No sistema de distribuição em análise são utilizados TC com relação de transformação de 800:5 A. A curva de saturação dos mesmos, mostrada na Figura 48, e seus valores na Tabela 23. Com relação aos valores característicos de resistência e indutância dos enrolamentos, obtida através de ensaios realizados pela concessionária, são apresentados na Tabela 24.

Corrente (A)	Fluxo (Wb*T)
0.005	0.0371
0.01	0.093
0.02	0.244
0.03	0.384
0.05	0.509
0.1	0.644
0.2	0.705
0.3	0.721

Tabela 23 – Curva de saturação do transformador de corrente.

Tabela 24 – Características do transformador de corrente.

Característica	Valores
Resistência do primário	0,278 Ω
Indutância do primário	1x10 ⁻⁴ H
Resistência do secundário	0,412 Ω
Indutância do secundário	1x10 ⁻⁴ H



Figura 48 – Curva de saturação do transformador de corrente.

Para a modelagem dos mesmos, foi utilizado o componente TRAFO_S e a curva de saturação foi inserida em um componente de indutância não linear *Type* 98. Na Figura 49 é mostrado o modelo já inserido no ATP.



Figura 49 – Modelo do transformador de corrente no ATP.

6.5.2 Transformadores de Potencial (TP)

Da mesma forma que os TC, os TPs realizam a transdução dos valores de tensão para níveis mais baixo que possibilitam a utilização de relés e equipamentos de medição de forma segura e sem necessidade de isolamentos no mesmo a níveis iguais a rede em que estão ligados. No sistema de distribuição em análise, os TPs utilizados possuem tensão de saída de 115 V, entre fases, e $115/\sqrt{3}$ V, entre fase e terra. A curva de saturação dos TPs é mostrada na Figura 50, e na Tabela 25, os valores da mesma. Já os dados de resistência e indutância dos enrolamentos são mostrados na Tabela 26.

Corrente (A)	Fluxo (Wb*T)
0.000565	2.24
0.000791	4.51
0.00108	6.75
0.00137	8.99
0.001602	11.2
0.0019221	13.5
0.00225	15.7
0.00272	18
0.00327	20.25
0.00436	22.5
0.00595	24.8
0.00877	27
0.0152	29.2
0.0366	31.5

Tabela 25 – Curva de saturação do transformador de potencial.

Característica	Valores
Resistência do primário	417,3 Ω
Indutância do primário	1x10 ⁻⁹ H
Resistência do secundário	0,085 Ω
Indutância do secundário	498x10 ⁻⁶ H

Tabela 26 – Características do transformador de potencial.



Figura 50 – Curva de saturação do transformador de potencial.

A modelagem dos TPs foi realizada com os mesmos componentes utilizados para a modelagem dos TCs. Na Figura 51, é mostrado o modelo já inserido no ATP.



Figura 51 – Modelo do transformador de potencial no ATP.

6.5.3 Filtro Anti-Aliasing

Na topologia dos relés de proteção, o filtro *anti-aliasing* exerce papel fundamental, pois busca evitar a ocorrência de sobreposição de espectros ou *aliasing* do sinal amostrado. Essa sobreposição de espectros pode acarretar, quando da conversão analógico/digital (A/D) do sinal, erros na digitalização e, consequentemente, corrupção da informação e erro de operação dos equipamentos (BARBOSA, 2010). Na Figura 52 é ilustrado o fenômeno de *aliasing*. Nesta, pode ser vista, inicialmente, a amostragem de um sinal contínuo, sendo que nesse caso, não haverá nenhum erro na reconstrução. Já para os casos *b* e *c*, é possível verificar que a frequência de amostragem permite obter dados do sinal que possibilitaria sua reconstrução, tendo em vista que mais de duas amostras por ciclo são obtidas. Já no caso *d*, pode-se verificar facilmente que as amostras obtidas na frequência de amostragem considerada, introduzem perdas de informação que impossibilitam a reconstrução do sinal. Essa perda de informação é conhecida como *aliasing*.

A aproximação de *Butterworth* costuma ser amplamente utilizada para a definição de filtros analógicos passa-baixa em relés de proteção. Sua característica de resposta praticamente plana na faixa de passagem e resposta decrescente acima da frequência de corte são extremamente desejáveis para o caso dos relés de proteção.



Figura 52 – Fenômeno de aliasing (Fonte: BARBOSA, 2010).

Um aspecto importante quando se trata de filtros é a sua resposta ao degrau. Um dos aspectos que pode ser verificado nessa resposta é o retardo inserido pelo filtro quando da inserção de um sinal na entrada a ser processado. Para os filtros *Butterworth*, ordens elevadas podem acarretar atrasos na resposta que são indesejáveis para o caso dos relés de proteção (BARBOSA, 2010). Dessa forma, será utilizado um filtro de segunda ordem no sistema modelado com frequência de corte de 1.920 Hz, tendo em vista o teorema de *Nyquist* que indica que a máxima frequência que pode existir em sinal para sua correta amostragem deve ser metade da frequência de amostragem [Coury et. al, 2007].

Para a modelagem do filtro *Butterworth* foi utilizada uma função de transferência de segunda ordem inserida em um componente *TACS* do ATP conhecido como TRANSF (ATPDraw, 2012). A função de transferência é mostrada na Equação 72.

$$G(s) = \frac{1}{2,7126x10^{-7}s^2 + 0,0007365s + 1}$$
(72)

6.5.4 Sistema de Amostragem

Após a passagem do sinal pelo filtro *anti-aliasing*, é feita a amostragem do sinal para, posteriormente, realizar a conversão A/D do mesmo. No sistema considerado de aquisição dos dados, a taxa de amostragem considerada é de 64 amostras por ciclo, ou seja, 3.840 Hz. Essa taxa foi considerada tendo em vista a existência de equipamentos que já operam com esses valores.

Para a modelagem do sistema de amostragem, foi elaborado um componente MODELS através da linguagem de programação FORTRAN, de forma a realizar uma sub-amostragem da simulação realizada, simulando a taxa proposta para a análise. O componente, a partir do passo de integração utilizado de 10⁻⁶ segundos, simula o sistema de amostragem, alterando seu valor de saída a cada 260 µs. Dessa forma, os valores intermediários são desconsiderados e a amostragem simulada.

Vale ressaltar que o vetor de dados de saída do componente permanece com a mesma quantidade de dados da entrada do mesmo. Isso ocorre tendo em vista o fato de que o passo de integração permanece igual durante todo o período. Para o descarte dos valores repetidos, foi preenchido o campo "Plot freq" no menu "ATP Settings" com o valor de 260. Dessa forma, na geração dos dados de saída do arquivo ".pl4", os valores repetidos, lembrando que a saída do componente MODELS irá alterar a cada 260 µs, não serão considerados.

6.5.5 Conversor A/D

A função do conversor A/D no sistema de aquisição de um relé de proteção é de discretizar os sinais analógicos obtidos após a amostragem realizada. Essa parte do processo é de grande importância tendo em vista que as características do conversor A/D afetam diretamente a qualidade e a fidelidade da representação do sinal analisado (SMITH, 1999). Caso essa parte do processo não represente adequadamente o sinal analógico, a perda de informação pode acarretar o funcionamento incorreto do relé.

A resolução do conversor A/D indica o passo existente nos níveis

digitais do conversor A/D em função do sinal analógico de entrada. Este valor, representado pela equação 73, indica o passo, *n* a quantidade de bits do conversor e *FS* o fundo de escala do mesmo.

$$\Delta A_{sinal} = \frac{FS}{2^n} \tag{73}$$

Para o sistema de aquisição utilizado será considerado que o sistema realiza a discretização com 12 *bits*, sendo que os valores máximos variam de -20 *In* a +20 *In*, sendo *In* a corrente nominal do relé, para a discretrização da saída dos TCs e de -2 p.u. a +2 p.u. para os TPs.

Para a modelagem do mesmo, foi utilizado o componente TACS DEVICE55 que é basicamente um conversor A/D. Na Figura 53 é mostrado um sinal discretizado de corrente, onde a representação na cor vermelha representa o sinal original e a em verde o sinal discretizado.



Figura 53 – Sinal discretizado de corrente.

7 METODOLOGIA PROPOSTA

Nesse capítulo será mostrada a metodologia proposta para detecção e localização de FAIs tendo como base três módulos:

- Módulo 1: Detecção de descontinuidades nos sinais de corrente;
- Módulo 2: Detecção da ocorrência de uma FAI tendo em vista a diferenciação de outros eventos que podem gerar transitórios de corrente;
- Módulo 3: Localização da FAI no alimentador 1.

O Módulo 1 terá como base a análise da variação de energia no detalhe de terceira ordem dos sinais de corrente obtidos a partir da transformada *wavelet Daubechies* 14. Para o Módulo 2, serão consideradas as distorções harmônicas de ordem par e ímpar de um ciclo de corrente pós-detecção do Módulo 1 em conjunto com a corrente de sequência zero para a determinação da ocorrência de uma FAI no alimentador 1. Para essa etapa foi considerada a utilização de uma RNA do tipo PMC com uma camada escondida. Para o Módulo 3, relacionado à localização da FAI, serão considerados os sinais de tensão e corrente do ciclo de detecção da FAI. Destes, serão extraídos a componente de corrente de sequência zero, a impedância vinculada a componente fundamental, a diferença angular entre a componente fundamental de tensão e corrente e a componente de terceira ordem da tensão. Para a localização será considerada a utilização de uma RNA do tipo PMC com duas camadas escondidas.

Vale esclarecer ainda que a metodologia proposta tem como premissa, operar em paralelo com o sistema de proteção associado ao SD. Dessa forma, haverá um monitoramento contínuo das correntes e tensões de fase para a determinação da ocorrência e localização de uma FAI, mas sem a decisão de desligamento do alimentador, deixando esse aspecto para o sistema de proteção ou para o operador.

7.1 MÓDULO 1: DETECÇÃO DA DESCONTINUIDADE DO SINAL

Para o desenvolvimento do Módulo 1, foram analisados diversos aspectos até a decisão pela utilização da variação de energia do detalhe de terceira ordem. Entre as informações analisadas se destacam o desvio-padrão dos coeficientes obtidos através da transformada *wavelet*, o somatório absoluto dos valores dos mesmos coeficientes e a variância dos mesmos valores sendo, no entanto, a variação de energia a característica onde foi verificada a maior possibilidade de detecção da descontinuidade. Vale ressaltar ainda que foram analisadas *wavelets* mães de diversas famílias (*Daubechies, Morlet, Symlet*, etc.), sendo que a *Daubechies* 14 mostrou-se com maior capacidade de extração das características necessárias.

Sendo assim, o primeiro módulo do método proposto trata da detecção de descontinuidades dos sinais em análise para possibilitar a inicialização do segundo módulo de detecção da ocorrência de uma falta de alta impedância. Esse primeiro módulo tem como principal objetivo detectar a ocorrência de uma descontinuidade no sinal que pode estar relacionada a um fenômeno transitório normal e esperado do sistema, ou a ocorrência de uma FAI.

Para essa etapa foi realizada uma análise de diversos eventos relacionados aos fenômenos de interesse e de operação normal do sistema através da Transformada *Wavelet* em conjunto com a determinação da energia do detalhe extraído.

Baseado nisso, a metodologia proposta se baseia na utilização de uma janela de um ciclo das correntes de fase com passo de 16 amostras, ou seja, um quarto de ciclo, onde o sinal é decomposto até o detalhe de quarta ordem utilizando a transformada *wavelet Daubechies* 14. Na Figura 54 é ilustrada a forma como é deslocada a janela deslizante com um passo de um quarto de ciclo.



Figura 54 – Janela deslizante de um quarto de ciclo.

Dessa forma, em cada espaço de 64 amostras da janela, os sinais são decompostos, através da transformada *Daubechies* 14 até o quarto nível de detalhe. Pode-se obter então a energia do detalhe de terceira ordem (d₃) através da equação 74.

$$E(d_3) = \sum_{i=1}^{64} d_3(i)^2$$
(74)

Nas Figuras 55 e 56 verifica-se o comportamento da variação de energia para um sinal de corrente sem a ocorrência de um evento e para um sinal com FAI. É possível constatar que na primeira, o valor se mantem praticamente igual a cada dois passos da janela deslizante. Já para a FAI, logo após a sua ocorrência, há uma grande variação da energia do detalhe de terceira ordem.



Figura 55 – Energia do detalhe de terceira ordem do sinal de corrente sem evento.

Baseado nisso, para a detecção da ocorrência de uma descontinuidade e, consequentemente, de um transitório para posterior definição do tipo do evento, propõem-se a análise da variação da energia do detalhe de terceira ordem de cada corrente do sistema entre uma janela de análise e outra. Empiricamente, verificou-se que caso a variação seja maior que 2%, há a ocorrência de uma descontinuidade no sistema em análise. Importante ressaltar que só após a passagem da janela pelo sinal é que se observa essa variação.

Dessa forma, tem-se na Figura 57 o fluxograma do Módulo 1 do método proposto. Primeiramente são obtidos os valores de corrente das três fases a uma taxa de 64 amostras por ciclo. Uma janela deslizante de 16 amostras é definida e, para cada passo da mesma, os valores de corrente são decompostos até o quarto nível de detalhe utilizando a Transformada *Wavelet Daubechies* 14. Utilizando os coeficientes do detalhe de terceira ordem é então determinada a energia do sinal nesse nível e comparado com o valor do penúltimo ciclo. Caso haja variação maior que 2% o algoritmo detectará a ocorrência de uma descontinuidade e, consequentemente, um evento no sistema.



Figura 56 – Energia do detalhe de terceira ordem do sinal de corrente com a ocorrência de FAI.

Nesse ponto é importante apontar que o monitoramento contínuo proposto nesse módulo permite que o mesmo opere em paralelo com o sistema de proteção, pois com uma janela de 64 amostras e um passo de um quarto de ciclo, mesmo que haja a sensibilização da proteção e a abertura do religador ou disjuntor, cujo tempo é de cerca de três ciclos, haverá dados suficientes para a verificação da ocorrência da FAI e consequente localização.



Figura 57 – Fluxograma proposto para o Módulo 1.

7.2 MÓDULO 2: DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Durante a análise dos principais tipos de transitórios em sistemas elétricos de potência, pode-se verificar que há algumas características harmônicas específicas para cada situação de operação. Por exemplo, na situação de energização de transformadores, há uma forte presença de componentes harmônicos de segunda e quantidades de quinta ordem (COURY et al., 2007). Já para as FAI, devido a todas as características manifestadas nas formas de ondas das mesmas, pode haver a presença de componentes harmônicos de baixa e de alta ordem, ordem ímpar, ordem par e de inter-harmônicos, devido às descontinuidades nos pontos de ignição e extinção do arco elétrico (NAKAGOMI, 2006).

Dessa forma, pode-se inferir que na ocorrência de transitórios em sistemas elétricos de potência, ocorrem distorções harmônicas manifestadas principalmente nas formas de ondas das correntes.

Neste contexto, tem-se que essas distorções podem ser caracterizadas pelo parâmetro de Distorção Harmônica Total (DHT) de corrente dado pela equação 75 seguir.

$$DHT(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{m} (I_n)^2}{I_1^2}}$$
(75)

Nessa equação, é representada a raiz da relação entre a soma do quadrado de *m* componentes harmônicos de corrente, partindo do harmônico de segunda ordem, e o quadrado do componente fundamental de corrente, I_1 .

No entanto, esse parâmetro coloca em uma mesma base todos os componentes harmônicos presentes nos sinais em análise. Dessa forma, pode ocorrer que sinais que possuem na sua composição a presença de componentes harmônicos de ordens diferentes tenham o mesmo percentual de DHT, desde que suas amplitudes se igualem no cálculo do mesmo.

Baseado nessa observação verificou-se que haveria a possibilidade de divisão do DHT em duas outras grandezas indicando o percentual de distorção causada pelos harmônicos de ordem par e pelos harmônicos de ordem ímpar. As equações a seguir podem explicitar melhor essa abordagem, onde a relação das magnitudes das componentes de ordem par em função da fundamental é dada por DHT_{par} , e a relação das componentes de ordem ímpar em função da fundamental por DHT_{impar} :

$$DHT_{par}(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{m} (I_{(2n)})^2}{I_1^2}}$$
(76)

$$DHT_{impar}(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{m} (I_{(2n+1)})^2}{I_1^2}}$$
(77)

Um aspecto de grande importância na dissertação é a característica inédita da abordagem acima. Nas pesquisas realizadas na literatura, não foram verificadas outras abordagens similares para esse tipo de problema. Vale ressaltar ainda que há grandes possibilidades para essa abordagem, principalmente, na identificação de eventos no SEP. Entende-se, dessa forma, como essa sendo uma das contribuições de elevada importância no presente trabalho, como poderá ser verificado nos resultados apresentados por esse Módulo.

Voltando as equações, o número de componentes harmônicos em análise é dado pelo parâmetro *m*. Esse valor poderá ser limitado tendo em vista a frequência de corte do filtro *antialiasing* utilizado. No caso em análise, conforme definido no Capítulo 4, a taxa de amostragem utilizada é de 3.840 Hz, ou seja, 64 amostras por ciclo, o que possibilitará a análise até o componente harmônico da 32^a ordem. Tal afirmação decorre da utilização de um filtro *antialiasing* com frequência de corte de 1.920 Hz.

Pela abordagem proposta, para o cálculo dos valores da DHT de ordem par e ímpar, é considerado o primeiro ciclo de cada corrente trifásica após a sinalização de ocorrência de descontinuidade pelo Módulo 1. Isso significa dizer que após a detecção pelo Módulo 1, o algoritmo considera três passos da janela deslizante para obter as entradas do Módulo 2. A Figura 58 ilustra a forma de interação entre as duas etapas e discrimina a janela utilizada para a detecção da descontinuidade e, após isso, a janela que será considerada para a entrada e inicialização do Módulo 2 do algoritmo.

Outro aspecto importante considerado ainda é a corrente de

sequência zero. Tendo em vista a necessidade de diferenciar a ocorrência de FAIs no alimentador 1, operando em estrela-aterrado, e dos alimentador de 13,8 kV, operando em delta, acrescentou-se a corrente de sequência zero como uma das características de interesse para o Módulo 2.

Após o cálculo dos parâmetros da DHT de ordens pares e ímpares, das três correntes de fase, etapa essa conhecida como de pré-processamento, os mesmos serão inseridos na entrada de uma rede neural do tipo PMC com uma camada escondida. Essa rede neural é que será responsável por indicar se o evento é uma FAI ou não. De forma a facilitar o entendimento da metodologia proposta, tem-se o fluxograma da Figura 59.



Figura 58 – Representação da janela a ser considerada como entrada do Módulo 2.



Figura 59 – Fluxograma proposto para o Módulo 2.

7.3 MÓDULO 3: LOCALIZAÇÃO DA FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

O Módulo 3 tem como foco determinar a localização da FAI detectada indicando a distância de ocorrência no alimentador 1. Como pôde ser visto na Revisão Bibliográfica realizada, não há muitos métodos desenvolvidos para a localização de FAIs e, mesmos esses métodos propostos, utilizam-se das mais variadas abordagens.

Dessa forma, buscou-se para a elaboração do Módulo 3 utilizar-se de componentes obtidos facilmente através das amostras dos sinais de corrente e tensão do ciclo utilizado para a detecção da FAI. Tal abordagem tem o intuito de proporcionar rapidez ao método, bem como mitigar a característica de intermitência da FAI. Para a definição das grandezas a serem utilizadas, foram analisados diversos aspectos das FAIs, tais como: tensões e correntes de harmônicos de terceira, quinta e sétima ordem e as respetivas impedâncias e diferenças angulares entre tensão e corrente nas mesmas ordens; relação entre os harmônicos de corrente de terceira e quinta ordem e a mesma grandeza na frequência fundamenta; e a relação entre as tensões referentes os harmônicos de terceira e quinta ordem e a mesma fundamental. De todas essas grandezas, as listadas abaixo foi que obtiveram os melhores resultados. Essa abordagem é similar à proposta de Moreto (2005).

Baseado nas análises realizadas e estudas, para a localização serão utilizados os seguintes dados e características:

- *I*₀ Corrente de sequência zero;
- V₁/l₁ Relação entre tensão e corrente da fundamental para cada fase;
- Δθ¹ Diferença angular entre a tensão e a corrente da fundamental para cada fase; e
- V_3 Tensão da harmônica de terceira ordem para cada fase.

Essas grandezas foram obtidas através da Transformada de Fourier. Para a localização da FAI, será utilizada uma RNA do tipo PMC com duas camadas escondidas. A Figura 60 mostra o fluxograma proposto para o Módulo 3. Pode-se verificar que a inicialização do mesmo tem como entrada as correntes e tensões de fase do ciclo pós-detecção da descontinuidade utilizado no Módulo 2. Com isso, são obtidas as características citadas anteriormente para cada uma das fases, bem como a corrente de sequência zero. Essas características são então inseridas como um vetor de dados na RNA já treinada, sendo sua saída o local estimado da ocorrência da FAI.



Figura 60 – Fluxograma proposto para o Módulo 3.

8 SIMULAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo serão apresentadas as simulações realizadas para a análise e validação do método proposto. Para o Módulo 1, a resposta frente a ocorrência ou não de uma descontinuidade é discutida e os resultados apresentados. Já para os Módulos 2 e 3, além dos resultados apresentados, são discutidas as topologias propostas de RNA de forma a avaliar a melhor escolha.

8.1 SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA ANÁLISE DO MÉTODO PROPOSTO

Para a análise da metodologia proposta foram simulados 84 eventos de transitórios nos alimentadores a jusante do alimentador 1, e 7 eventos de operação normal sobre o sistema elétrico em análise. Além disso, foram simuladas 12 FAIs na área de 13,8 kV das SEs em questão e 144 eventos de FAIs no alimentador 1.

8.1.1 Simulações de Eventos Esperados do Sistema e FAIs na Área de 13,8 kV

Os eventos considerados como normais e/ou esperados sobre o sistema e que foram simulados, bem como a quantidade de simulações são mostrados na Tabela 27.

Tabela 27 – Eventos simulados sobre o sistema elétrico em análise

Situação simulada	Quantidade de eventos
Operação normal	7
Chaveamento de BC	24
Forno a arco	20
Partida de motores	32
Energização de transformadores	8

Para cada uma das situações simuladas, têm-se as seguintes considerações:

- Partida de motores: para garantir a diversidade dos eventos simulados relacionados à partida dos motores, além dos alimentadores onde os mesmos estão conectados, foram variados parâmetros referentes à distância da localização dos mesmos em relação à subestação, bem como, em alguns casos, a partida em conjunto dos motores de 50 e 75 HP. Na Tabela 28 são apresentados todos os eventos simulados;
- Forno a arco: para as situações da entrada em operação do forno a arco, as simulações foram realizadas nos alimentadores a jusante do alimentador 1, com variações do local de conexão do mesmo na rede. Na Tabela 29 são apresentados os eventos considerados;
- Chaveamento de bancos de capacitores: para a simulação do chaveamento dos bancos de capacitores, foram consideradas situações de chaveamento do banco de forma isolada, assim como *back-to-back*. Nas Tabelas 30 e 31 são mostrados os eventos simulados para as subestações B e C, respetivamente;
- Energização de transformadores: para a simulação da energização de transformadores, foram consideradas situações com e sem carga a jusante. Para a retirada da carga a jusante, o respectivo alimentador foi desligado por inteiro. Na Tabela 32 são mostrados os eventos simulados;
- Operação normal: para a simulação da operação normal do sistema, foram consideradas situações de variação da carga, com a retirada de operação de algum alimentador. Para cada uma das sete situações simuladas, sempre um dos alimentadores foi retirado de operação.

De forma a ainda possibilitar a validação da metodologia proposta frente às ocorrências de FAIs nos alimentadores de 13,8 kV a jusante do alimentador 1 de interesse, foram simulados 12 eventos desse tipo conforme mostrados na Tabela 33.

Tabela 28 – Partida de motores simulados.

Alimentador	Localização	Motores Simulados
Alimentador 6	Final do Segundo Trecho	50 HP
Alimentador 7	Final do Primeiro Trecho	50 HP
Alimentador 7	Início do Primeiro Trecho	50 HP
Alimentador 3	Final do Quarto Trecho	50 HP
Alimentador 3	Final do Segundo Trecho	50 HP
Alimentador 2	Final do Terceiro Trecho	50 HP
Alimentador 2	Início do Primeiro Trecho	50 HP
Alimentador 8	Final do Primeiro Trecho	50 HP
Alimentador 8	Final do Terceiro Trecho	50 HP
Alimentador 5	Final do Segundo Trecho	50 HP
Alimentador 4	Início do Primeiro Trecho	50 HP
Alimentador 4	Final do Terceiro Trecho	50 HP
Alimentador 4	Final do Segundo Trecho	75 HP
Alimentador 4	Final do Primeiro Trecho	75 HP
Alimentador 5	Final do Terceiro Trecho	75 HP
Alimentador 8	Início do Primeiro Trecho	75 HP
Alimentador 6	Início do Primeiro Trecho	75 HP
Alimentador 7	Final do Segundo Trecho	75 HP
Alimentador 3	Início do Primeiro Trecho	75 HP
Alimentador 3	Final do Quinto Trecho	75 HP
Alimentador 2	Final do Segundo Trecho	75 HP
Alimentador 2	Final do Primeiro Trecho	75 HP
Alimentador 2	Final do Terceiro Trecho	50 HP e 75 HP
Alimentador 3	Final do Primeiro Trecho	50 HP e 75 HP
Alimentador 3	Final do Terceiro Trecho	50 HP e 75 HP
Alimentador 7	Final do Primeiro Trecho	50 HP e 75 HP
Alimentador 6	Final do Segundo Trecho	50 HP e 75 HP
Alimentador 8	Final do Segundo Trecho	50 HP e 75 HP
Alimentador 5	Início do Primeiro Trecho	50 HP e 75 HP
Alimentador 5	Final do Terceiro Trecho	50 HP e 75 HP
Alimentador 4	Final do Primeiro Trecho	50 HP e 75 HP
Alimentador 4	Final do Terceiro Trecho	50 HP e 75 HP

Alimentador	Localização
Alimentador 8	Final do Primeiro Trecho
Alimentador 8	Final do Terceiro Trecho
Alimentador 5	Início do Primeiro Trecho
Alimentador 5	Final do Segundo Trecho
Alimentador 4	Final do Primeiro Trecho
Alimentador 4	Final do Terceiro Trecho
Alimentador 6	Final do Segundo Trecho
Alimentador 6	Final do Primeiro Trecho
Alimentador 6	Início do Primeiro Trecho
Alimentador 7	Início do Primeiro Trecho
Alimentador 7	Final do Primeiro Trecho
Alimentador 7	Final do Segundo Trecho
Alimentador 3	Final do Segundo Trecho
Alimentador 3	Final do Quinto Trecho
Alimentador 3	Final do Terceiro Trecho
Alimentador 2	Final do Terceiro Trecho
Alimentador 2	Final do Segundo Trecho
Alimentador 2	Início do Primeiro Trecho
Alimentador 3	Final do Primeiro Trecho
Alimentador 3	Início do Primeiro Trecho

Tabela 29 – Conexões do forno a arco sobre o SD.

Tabela 30 – Chaveamentos de bancos de capacitores na subestação B.				
100 kVAr	200 kVAr	300 kVAr		
Fechando	Aberto	Aberto		
Aberto	Fechando	Aberto		
Aberto	Aberto	Fechando		
Fechando	Fechado	Fechado		
Fechando	Fechado	Aberto		
Fechando	Aberto	Fechado		
Fechado	Fechando	Fechado		
Aberto	Fechando	Fechado		
Fechado	Fechando	Aberto		
Aberto	Fechado	Fechando		
Fechado	Fechado	Fechando		
Fechado	Aberto	Fechando		

100 kVAr	300 kVAr	600 kVAr	
Fechando	Aberto	Aberto	
Aberto	Fechando	Aberto	
Aberto	Aberto	Fechando	
Fechando	Fechado	Fechado	
Fechando	Fechado	Aberto	
Fechando	Aberto	Fechado	
Fechado	Fechando	Fechado	
Aberto	Fechando	Fechado	
Fechado	Fechando	Aberto	
Aberto	Fechado	Fechando	
Fechado	Fechado	Fechando	
Fechado	Aberto	Fechando	

Tabela 31 – Chaveamentos de bancos de capacitores na subestação C.

Tabela 32 – Eventos simulados de energização de transformadores.

Subestação	Condição de Carga	
В	Sem carga a jusante	
В	Alimentador 3 ligado	
В	Alimentador 2 ligado	
В	Alimentadores 2 e 3 ligados	
С	Sem carga a jusante	
С	Alimentador 6 ligado	
С	Com alimentador 7 ligado	
С	Alimentadores 6 e 7 ligados	

Tabela 33 -	 Eventos de 	e FAI nos	alimentadores	de 13,8 kV.
-------------	--------------------------------	-----------	---------------	-------------

Alimentador	Local	Fase	Corrente	V_N	V_P
2	Final do Trecho 1	А	30 A	2.000 V	3.000 V
3	Final do Trecho 3	В	30 A	2.000 V	3.000 V
7	Final do Trecho 2	А	30 A	2.000 V	3.000 V
6	Final do Trecho 1	А	30 A	2.000 V	3.000 V
6	Início do Trecho 1	С	20 A	2.500 V	3.500 V
7	Final do Trecho 1	В	20 A	2.500 V	3.500 V
3	Final do Trecho 4	С	20 A	2.500 V	3.500 V
2	Final do Trecho 2	В	20 A	2.500 V	3.500 V
2	Início do Trecho 1	С	10 A	1.000 V	1.500 V
3	Início do Trecho 3	В	10 A	1.000 V	1.500 V
7	Início do Trecho 1	А	10 A	1.000 V	1.500 V
6	Final do Trecho 1	В	10 A	1.000 V	1.500 V

8.1.2 Simulações de FAIs no Alimentador 1

Para o alimentador de interesse foram simulados 144 eventos caracterizando faltas de alta impedância. Para esses eventos, as seguintes situações foram consideradas:

- Distâncias variando entre 0 e 100% do comprimento da linha, que é de 19 quilômetros;
- Amplitudes da corrente de falta com valores de 10, 20 e 30 A;
- As FAIs foram simuladas entre cada uma das três fase e terra;
- Tensão de ignição e extinção do arco com valores de 1.500 V e 5.000 V para V_N e, 2.500 V e 6.000 V para V_P.

8.2 MÓDULO 1: RESULTADOS OBTIDOS

Para o Módulo 1 foram considerados todos os 247 eventos simulados de forma a avaliar se há a detecção da descontinuidade e em qual passo isso ocorre. Cada um desses eventos foi considerado por 6 ciclos sendo que a incidência de cada um ocorre no início do terceiro ciclo. Vale reforçar que a janela deslizante é de 64 amostras com passo de 16 amostras.

Os resultados obtidos com o método proposto são apresentados na Tabela 34. Como podem ser observados, todos os eventos foram corretamente detectados. Analisando ainda o momento da detecção, pode-se confirmar também que esta ocorreu sempre no momento em que as primeiras amostras da descontinuidade estiveram presentes na janela deslizante do ciclo em análise. Dessa forma, pode-se confirmar que houve efetividade e agilidade no resultado obtido pelo Método 1.

Tabela 34 – Eventos simulados de energização de transformadores.

Situação	Simulados	Detectados
Sem Evento	7	7
Com Evento	240	240
Para o caso em que não há nenhum evento, tem-se o desenvolvimento da variação de energia e da detecção da ocorrência da descontinuidade mostrado na Figura 61. Como pode ser observada, a variação de energia permanece 0% para as três fases e, consequentemente, não há ativação do nível lógico "1" para sinalizar a detecção de descontinuidade. Dessa forma, não há ativação do Módulo 2, tendo em vista a não ocorrência de evento no sistema.



Figura 61 – Representação da não detecção de sinal sem evento de descontinuidade.

Outra situação é na ocorrência da descontinuidade. Nas Figuras 62, 63, 64, 65 e 66 são mostradas as mesmas características da figura anterior quando da ocorrência de eventos que chaveamento de bancos de capacitores, partida de motores, operação de fornos a arco, energização de transformadores e FAIs, respectivamente. Para exemplificar, tem-se, na Figura 66, uma FAI na fase *A* do alimentador 1. Nesse caso, pode-se verificar que os percentuais de variação de energia sobem logo após a janela passar pelo primeiro quarto de ciclo do início do terceiro ciclo (ponto de incidência da falta), ou seja, aos 37,5 milissegundos. Como a variação é de cerca de 80%, acima do patamar de 2% pré-estabelecido, o nível lógico da detecção sobe para "1". Dessa forma, há a detecção da descontinuidade e, consequentemente, a inicialização do Módulo 2. Essa situação pode ser verificada nos demais eventos mostrados nas referidas Figuras.



Figura 62 – Evento relacionado a chaveamento de BCs.



Figura 63 – Evento relacionado à partida de motores.



Figura 64 – Evento relacionado à operação de fornos a arco.



Figura 65 – Evento relacionado à energização de transformadores.



Figura 66 – Evento relacionado a ocorrência de FAI.

8.3 MÓDULO 2: RESULTADOS OBTIDOS

Com os dados obtidos após o pré-processamento, foram analisadas sete topologias de redes neurais PMC. Nas topologias, apenas uma camada escondida foi considerada e, a quantidade de neurônios da mesma variou entre dois, três, quatro, cinco, dez, quinze e vinte. Já na saída da RNA, considerou-se o valor "1" para detecção da FAI e o valor "0", para uma situação normal do sistema. Considerou-se ainda uma taxa de aprendizagem, η , de 0,01 e precisão de 10⁻⁷.

Para possibilitar a análise das topologias, foi utilizado o método de validação cruzada por amostragem aleatória (SILVA et al, 2010). Nesse método, dos padrões totais disponíveis, uma quantidade, escolhida aleatoriamente, foi utilizada para a fase de treinamento. Conforme definido no método, essa quantidade pode variar de 60 a 90% do total de eventos. No caso em análise, foi considerado um conjunto de treinamento com 70% do total de amostras, e 30% para o conjunto de testes. Dessa forma, tendo em vista que já houve a detecção da descontinuidade no sinal, foram considerados apenas os 240 eventos relacionados aos transitórios e FAIs no sistema. Sendo assim, 168 eventos foram considerados no conjunto de treinamento e 72 no conjunto de testes.

Cabe frisar ainda que conforme o método da validação cruzada por amostragem aleatória descrito acima, devem-se alterar a composição dos conjuntos a cada ensaio. Sendo assim, foram realizados quatro ensaios com alteração das amostras que compuseram os conjuntos de treinamento e de teste. Na Tabela 35 são mostrados os resultados obtidos tendo em vista a assertividade da resposta de cada uma das topologias consideradas.

	l abela 35 – Percentual de acerto para cada topologia.										
Ensaio		Quantidade de Neurônios na Camada Escondida									
	2	3	4	5	10	15	20				
1	99,31%	99,31%	99,31%	97,92%	99,31%	98,61%	99,31%				
2	98,61%	98,61%	97,22%	98,61%	97,22%	98,61%	97,22%				
3	97,22%	99,31%	99,31%	100%	99,31%	99,31%	98,61%				
4	98,61%	98,61%	98,61%	98,61%	98,61%	98,61%	98,61%				
Média	98,44%	98,96%	98,61%	98,78%	98,61%	98,78%	98,44%				

Tendo como base os resultados obtidos relacionados à assertividade, pode-se inferir que as 7 topologias avaliadas possuem respostas bem parecidas no âmbito geral da análise, podendo, em um primeiro momento, indicar a utilização de qualquer uma das mesmas para a detecção. Dessa forma, outro aspecto analisado refere-se à correta não detecção de FAIs na área de 13,8 kV como FAIs no alimentador 1. Essa característica é de grande importância de forma a evitar o incorreto direcionamento da equipe, bem como o desligamento do alimentador errado. Na Tabela 36 podem-se verificar os resultados obtidos.

Tabela 36 – Percentual de acerto para cada topologia na detecção de FAIs na área de 13,8 kV.

Enooid		Qua	ntidade de N	Neurônios na	a Camada Es	scondida	
Ensaid	2	3	4	5	10	15	20
1	100%	100%	100%	100%	100%	87,5%	100%
2	87,5%	87,5%	100%	87,5%	100%	87,5%	100%
3	87,5%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
4	87,5%	87,5%	87,5%	87,5%	87,5%	87,5%	87,5%
Média	90,63%	93,75%	96,88%	93,75%	96,88%	90,63%	96,88%

Apesar de a amostra de FAIs na área de 13,8 kV ser relativamente pequena, é possível verificar que há uma maior divergência de desempenho entre as topologias. Dessa forma, destacam-se as arquiteturas com 4, 10 e 20 neurônios na camada escondida. Um aspecto importante ainda relaciona a complexidade computacional das topologias. Nesse caso, das três indicadas, a com 4 neurônios mostra-se menos complexa e, consequentemente, mais rápida.

Outro aspecto que ainda pode ser discutido é com relação à quantidade de falsos positivos e falsos negativos obtidos em cada um dos ensaios para cada topologia proposta. Nas Tabelas 37 e 38 são mostradas as quantidades de falsos positivos e falsos negativos, respectivamente. Tendo em vista os valores altos de assertividade obtidos para todas as configurações, pode-se inferir que a quantidade de falsos positivos e falsos negativos seja baixa.

No entanto, um aspecto importante e difícil de avaliar é qual das duas situações é melhor do ponto de vista da concessionária. No caso do falso positivo, haveria o desligamento do alimentador ou mesmo deslocamento de recurso para verificação sem a necessidade do mesmo. Já no caso do falso negativo, poderse-ia ter uma situação de risco, por exemplo, um cabo rompido em solo de alta resistividade, sem o correto tratamento. Dessa forma, um estudo e melhor definição desse aspecto pela concessionária são necessários. Esse aspecto, no entanto, não indica nenhuma limitação inicial ao método proposto.

Ensaio		Quantidade de Neurônios na Camada Escondida								
	2	3	4	5	10	15	20			
1	0	0	0	0	0	1	0			
2	1	1	0	1	0	1	0			
3	3	1	0	0	0	0	0			
4	1	1	1	1	1	1	1			
Média	1,25	0,75	0,25	0,5	0,25	0,75	0,25			

Tabela 37 – Falsos positivos por ensaio

Tabela 38 – Falsos negativos por ensaio.										
Encoio		Qua	ntidade de N	Neurônios na	a Camada Es	condida				
Ensalo	2	3	4	5	10	15	20			
1	1	1	1	3	1	1	1			
2	1	1	4	1	4	1	4			
3	1	0	1	0	1	1	2			
4	1	1	1	1	1	1	1			
Média	1	0,75	1,75	1,25	1,75	1	2			

8.4 MÓDULO 3: RESULTADOS OBTIDOS

O Módulo 3 do método proposto tem como foco a localização das FAIs no alimentador 1. Conforme o fluxograma definido para o mesmo, uma RNA do tipo PMC com duas camadas escondidas será utilizada tendo em vista a similaridade deste problema com aproximações de função, onde esse tipo de topologia é recomendado (SILVA et al., 2010).

Para determinar a melhor topologia a ser utilizada, foi considerado novamente o método de validação cruzada por amostragem aleatória (SILVA et al. 2010). As topologias a avaliadas contem:

- 5 neurônios na primeira camada escondida e 5 neurônios na segunda camada escondida;
- 10 neurônios na primeira camada escondida e 10 neurônios na segunda camada escondida;
- 15 neurônios na primeira camada escondida e 15 neurônios na segunda camada escondida;
- 20 neurônios na primeira camada escondida e 20 neurônios na segunda camada escondida;
- 20 neurônios na primeira camada escondida e 15 neurônios na segunda camada escondida;
- 20 neurônios na primeira camada escondida e 10 neurônios na segunda camada escondida; e
- 15 neurônios na primeira camada escondida e 5 neurônios na segunda camada escondida.

Conforme descrito no fluxograma para a etapa, as correntes de fase e de sequência zero utilizadas são as mesmas do Módulo 2, sendo obtidos, para o mesmo ciclo, os sinais amostrados de tensão das três fases.

Como o foco do módulo é a localização de FAIs no alimentador 1, foram considerados os 144 eventos simulados desse tipo. Para o conjunto de testes e validação, dividiram-se os eventos em 80% para o primeiro (115 amostras) e 20% para o segundo (29 amostras). Além disso, considerou-se uma taxa de aprendizagem, η , de 0,01 e a precisão de 10^{-7} . Para a verificação da efetividade da

distância estimada, considerou-se o erro em percentual do comprimento total do alimentador 1 que é de 19 quilômetros. Na Equação 78 é mostrada a forma de cálculo desse erro onde x indica a distância da falta.

$$erro[\%] = \left| \frac{x_{real}(km) - x_{obtido}(km)}{19 \ km} \right| * 100$$
(78)

Foram então realizados quatro ensaios com alteração das amostras presentes nos conjuntos de teste e treinamento. Com isso, obtiveram-se os erros médios mostrados na Tabela 39.

Tabela 39 – Erro médio (% do comprimento da linha) para cada topologia e ensaio realizado. Quantidade de Neurônios em Cada Camada Escondida

Ensaio		Quantic	lade de Neu	rônios em C	ada Camada	a Escondida	
	5/5	10/10	15/15	20/20	20/15	20/10	15/5
1	2,88%	2,80%	2,59%	2,68%	2,70%	2,88%	2,73%
2	4,10%	3,66%	3,66%	3,66%	3,52%	3,74%	4,07%
3	3,46%	3,06%	2,89%	3,18%	2,66%	3,54%	2,95%
4	2,38%	2,74%	2,95%	3,00%	2,44%	2,64%	2,74%
Média	3,21%	3,07%	3,02%	3,13%	2,83%	3,20%	3,12%

Considerando uma linha de 19 quilômetros, pode-se inferir que o erro de localização médio foi de cerca de 500 a 600 metros, ou seja, com um vão padrão entre postes de 100 metros, de 5 ou 6 estruturas para cada lado. Em termos de distribuição, esse erro é extremamente baixo. Podem-se comparar ainda estes resultados com os obtidos em por Moreto em 2005. Nesse último estudo, o erro médio, em percentual do comprimento da linha de distribuição, dos algoritmos de Takagi et al. (1982) e de Lee et al. (2004) para localização de FAIs foi de 37,91% e 45,16% considerando um carregamento de 100% da mesma. Para os casos com menor carregamento, o erro foi ainda maior.

Analisando o erro máximo de cada um dos ensaios tem-se a Tabela 40 mostrada a seguir. Pode-se verificar que a configuração com 20 neurônios na primeira camada escondida e 15 neurônios na segunda camada escondida, além de possuir o menor erro médio, possui também os menores valores relacionados ao maior erro obtido no ensaio.

			-				
Ensaio		Quantic	lade de Neu	rônios em C	ada Camada	a Escondida	
	5/5	10/10	15/15	20/20	20/15	20/10	15/5
1	8,68%	7,56%	8,67%	6,91%	5,63%	9,60%	8,76%
2	9,58%	8,54%	7,76%	7,43%	7,55%	10,42%	10,47%
3	10,12%	8,87%	7,05%	8,86%	7,17%	9,91%	9,10%
4	7,90%	8,91%	7,17%	8,55%	7,04%	10,13%	7,93%
Média	9,07%	8,47%	7,66%	7,94%	6,85%	10,02%	9,07%

Tabela 40 – Erro médio (% do comprimento da linha) para cada topologia e ensaio realizado.

Nas Figuras 67, 68, 69 e 70 são mostradas a distância real, a distância estimada, o erro percentual e o erro médio (ambos relacionados ao eixo da direita), todos em termos do percentual total da linha, dos quatro ensaios realizados para a configuração com 20 neurônios na primeira camada escondida e 15 neurônios na segunda camada escondida. Pode-se verificar que em todos os casos, há uma aproximação efetiva entre a distância real da falta simulada e a distância estimada. Além disso, nos ensaios 2, 3 e 4, há uma maior quantidade de erros com valores menores que o erro médio calculado, indicando que a distância a ser inspecionada descrita anteriormente, cerca de 500 a 600 metros, pode ser menor na maioria dos casos. Analisando ainda os gráficos, pode-se verificar que não há elevação ou diminuição do erro em função da distância da FAI do início do alimentador.



Figura 67 – Erro em percentual da linha de cada amostra do Ensaio 1.



Figura 68 – Erro em percentual da linha de cada amostra do Ensaio 2.



Figura 69 – Erro em percentual da linha de cada amostra do Ensaio 3.



Figura 70 – Erro em percentual da linha de cada amostra do Ensaio 4.

Um detalhe importante ainda a se comentar é que as FAIs consideradas possuem características que foram variadas durante as simulações (V_N, V_P, amplitude máxima e distância), induzindo a uma dificuldade maior de treinamento efetivo das RNAs consideradas. Dessa forma, os resultados obtidos mostram-se muito válidos e promissores, pois uma boa gama de características foi englobada no estudo.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, buscou-se apresentar uma abordagem para detecção e localização de FAIs através de uma arquitetura modular. Dessa forma, foram analisados separadamente cada módulo e os seus resultados, discutidos.

No Módulo 1, pode-se verificar que a abordagem tendo como base a análise da variação de energia do detalhe d₃ obtido através da transformada *wavelet Daubechies* 14 mostrou-se extremamente eficaz com todos os eventos sendo detectados. Pode-se verificar que a variação determinada empiricamente em 2% mostrou-se correta para os eventos em análise. Cabe ressaltar ainda que a mesma utiliza-se de uma janela de um quarto de ciclo e que, todos os eventos foram detectados logo na primeira janela do evento, ou seja, a descontinuidade foi detectada com no máximo um quarto de ciclo após sua ocorrência. Essa situação indica uma ótima agilidade e rapidez para a aplicação em tempo real.

Para o Módulo 2, considerou-se então a classificação do evento detectado pelo Módulo 1 em situações de FAI ou não. Para isso, utilizou-se um ciclo das correntes de fase pós-detecção do Módulo 1 para determinação dos DHTs de ordem ímpar e par e da corrente de sequência zero. Foram analisadas então sete topologias de RNAs com variação de neurônios da camada de saída e pode-se verificar que as respostas obtidas por cada uma foram acima de 98%. Evoluindo na análise, pode-se verificar que a resposta das topologias para FAIs ocorridas nos alimentadores a jusante do alimentador 1, foi melhor com 4, 10 e 20 neurônios na camada escondida. Destas topologias, verificou-se que a complexidade computacional para 4 neurônios é menor que para os outros casos, considerando, portanto, essa topologia.

Um aspecto importante ainda do Módulo 2 é referente a ocorrência de falsos positivos e falsos negativos. Apesar da quantidade pequena, tendo em vista a assertividade obtida, esse ponto necessita de uma maior discussão caso a metodologia seja implantada nas concessionárias tendo em vista a relação existente entre a segurança operacional e o desligamento desnecessário de alimentadores. Dessa forma, propõe-se que esse ponto seja bem determinado pela área de operação antes da implantação de qualquer metodologia ou procedimento do tipo.

Para o Módulo 3, responsável pela estimação da localização da FAI, foram utilizados os valores obtidos, com auxílio da FFT, para o mesmo ciclo utilizado

no Módulo 2, da corrente de sequência zero, da relação entre a tensão e corrente da fundamental, da diferença angular entre a tensão e corrente da fundamental e da tensão de terceira harmônica, em conjunto com uma RNA do tipo PMC com duas camadas escondidas. Foram analisadas também sete topologias com variação nos neurônios das duas camadas escondidas. Analisando os resultados obtidos, pode-se verificar que o erro médio, em termos de percentual de comprimento da linha de distribuição, variou de 3,20% a 2,83% com o erro máximo variando de 10,02% a 6,85%. Importante salientar que os valores de 2,83% de erro médio e 6,85% de erro máximo foram obtidos com a configuração da RNA com 20 neurônios na primeira camada escondida e 15 neurônios na segunda camada escondida. Estes valores encontrados, tendo em vista as distâncias envolvidas na linha em análise, com aproximadamente 19 quilômetros, mostram-se muito satisfatórios, pois acarretariam, na média, um erro de cerca de ± 500 metros, ou seja, cinco vãos de cabo.

Um aspecto ainda importante na metodologia proposta como um todo é o fato de possibilitar a detecção e localização da FAI com apenas $\frac{3}{4}$ de ciclos após a detecção da descontinuidade (três passos após a janela utilizada no Módulo 1). Dessa forma, tem-se que o algoritmo não tem interferência dos sistemas de proteção convencionais tendo em vista que o tempo de atuação dos mesmos, desde a detecção até a abertura dos disjuntores, é comumente maior que três ciclos.

Baseado no exposto acima, conclui-se que o trabalho apresentou um método modular, aderente com a revisão bibliográfica pesquisada, obtendo ótimos resultados, tanto de detecção quanto de localização das FAIs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISON, P. S. "The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance. Institute of Physics Publishing. ISBN 0-7503-0692-0. 2002.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade de Energia. 72 f. Brasil. 2012

AL-DABBAGH, M.; AL-DABBAGH, L. "Neural networks based algorithm for detecting high impedance faults on power distribution lines", Proc. Int. Joint Conf. Neural Networks, vol. 5, pp.3386-3390, 1999.

ALI, M.S. et al. "High impedance fault localization in a distribution network using the discrete wavelet transform". IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malaysia, p. 349-354, 2012.

ATPDraw: The graphical preprocessor to ATP Electromagnetic Transients Program, versão 5.9, NTNU, 2012.

AUCOIN, B.M.; BENNER, C.; RUSSEL, D.R, "High impedance fault detection for industrial power systems", Proc. Conf. Rec., IEEE Industry Applications Soc. Annu. Meeting, vol. 2, p.1788-1792, 1989.

AUCOIN, B.M.; JONES, R.H., "High Impedance Fault Implementation Issues", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 11, Number 1, p. 139-148, January 1996.

AZIZ, M.S.A.; HASSAN, M.A.M.; ZAHAB, E.A. "Applications of ANFIS in high impedance faults detection and classification in distribution networks". Power Electronics & Drives (SDEMPED), IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, p. 612-619, 2011.

BAQUI, I.; MAZON, A.J.; ZAMORA, I; VICENTE, R. "High Impedance Fault Detection in Power Distribution System by Combination of Artificial Neural Network and Wavelet Transform". 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, p. 1-4, 2005.

BARBOSA, D. Sistema Híbrido Inteligente para Monitoramento e Proteção de Transformadores de Potência. 232 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BENNER, C.; RUSSEL, D.R., " Practical High Impedance Fault Detection On Distribution Feeders", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No: 3, MAY/JUNE 1997

ANAFAS: Análises de Faltas Simultâneas. Versão 5.1: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), 2009.

COSER, J.; DO VALE, D.T.; ROLIM, J.G.. "Artificial neural network based method for fault location in distribution systems". International conference on intelligent systems application to power systems. P. 157-162, 2005.

COURY, D V ; OLESKOVICZ, M. ; GIOVANINI, R. . Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes. 1. ed. São Carlos: Universidade de São Paulo, v. 1. 378p. 2007.

DAS, R.; SACHDEV, M.S.; SIDHU, T.S. "A Fault Locator for Radial Subtransmission and Distribution Lines," in Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, p. 443-448, July 2000.

DE OLIVEIRA, H. M. . Análise de Sinais para Engenheiros: Wavelets ISBN 978-85-7452-283-8. 1. ed. Rio de Janeiro: Brasport Livros, p. 268, 2007.

DECKMANN, S.M.; POMILIO, J.A. Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica. Apostila do Curso, 2010. Universidade Estadual de Campinas.

DWIVEDI, U.D.; SINGH, S.N.; SRIVASTAVA, S.C. "A Wavelet based Approach for Classification and Location of Faults in Distribution Systems", IEEE Conf. & Exhibition on Control, Communication and Automation (INDICON), India, vol. 2 p. 488-493, 2008.

ELKALASHY, N.; LEHTONEN, M.; DARWISH, H.; IZZULARAB, M.; TAALAB, A. "Modeling and Experimental Verification of a High Impedance Arcing Fault in MV Networks" IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 14, no. 2, p. 375-383, April 2007

ELKALASHY, N.; LEHTONEN, M.; DARWISH, H.; IZZULARAB, M.; TAALAB, A. "Feature Extraction of High Impedance Arcing Faults in Compensated MV Networks. Part I: DWT-Based Analysis of Phase Quantities" Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica '07. IEEE, May 2007.

ELKALASHY, N.; LEHTONEN, M.; DARWISH, H.; IZZULARAB, M.; TAALAB, A. "Feature Extraction of High Impedance Arcing Faults in Compensated MV Networks. Part II: DWT-Based Analysis of Residual Components". Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica '07. IEEE, May 2007.

ELKALASHY, N.; LEHTONEN, M.; DARWISH, H.; IZZULARAB, M.; TAALAB, A. "Operation evaluation of DWT-based earth fault detection in unearthed MV networks". MEPCON 2008. 12th International Middle-East Power System Conference, p. 208-212, 2008.

ELKALASHY, N.; LEHTONEN, M.; DARWISH, H.; IZZULARAB, M.; TAALAB, A. "Verification of DWT-Based Detection of High Impedance Faults in MV Networks". DPSP 2008. IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection, 2008.

ELREFAIE, H.B. "High impedance fault detection based on wavelet transform and Prony's method". MEPCON 2006. Eleventh International Middle East Power Systems Conference, p. 103-111, 2006.

EMANUEL, A.E.; CYGANSKI, D.; ORR, J.A.; SHILLER, S.; GULACHENSKI, E.M. "High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: Contribution to the evaluation of the low frequency spectrum", IEEE Trans. Power Del., vol. 5, no. 2, p.676-686, 1990.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Projeção de demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2013-2022). Ministério de Minas e Energia. 93 f. Rio de Janeiro, Brasil. 2012.

ETEMADI, H.; SANAYE-PASAND, M. "High impedance fault detectionusing multiresolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inferencesystem", Inst. Eng. Technol. Gen. Transm. Distrib., vol. 2, no. 1, p. 110-118, 2008.

FERREIRA, C. Transitórios Eletromagnéticos. Itajubá, 2010, 345 p. Apostila do Curso de Especialização em Proteção de Sistemas Elétricos. Universidade Federal de Itajubá.

FLAUZINO, R.A. Identificação e Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição Baseadas em Decomposição por Componentes Ortogonais e Inferência Fuzzy. 356 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GARCIA, M.A. A modelagem de cargas especiais (não-lineares) para estudos relacionados à qualidade de energia elétrica via o software ATP. 90 f. Trabalho de Conclusão do Curso. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

GARCIA, V.T.; PAREDES, H.R. "High impedance fault detection in Distribution System using Wavelet Transform". 8th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2011.

GIRGIS, A.A.; FALLON, C.M.; LUBKEMAN, D.L. "A fault location technique for rural distribution feeders", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 29, p. 1170-1175, 1993.

GREENWOOD, A. Electrical Transients in Power Systems. 2nd Edition. John Willey and Sons Inc. 752p. 1991.

HARLOW, J.H. Electric Power Transformer Engineering. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2007.

HAYKIN, S. Neural Networks: A Compreensive Foundation. 2nd Edition. Prentice Hall, 842 p. 1999.

HORTON, R. "A time-domain ac electric arc furnace model for flicker planning studies". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, p. 1450-1457, 2009.

IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, 1999.

KEYHANI, R.; DERICHE, M.; PALMER, E. "A high impedance fault detector using a neural network and subband decomposition", Proc. 6th Int. Symp. Signal Processing Applications, vol. 2, p. 458-461, 2001

KULKARNI, S.V.; KHAPARDE, S.A. "Transformer Engineering: Design and Practice. New York: Marcel Dekker, 2005, Inc. ISBN: 0-8247-5653-2.

LAZKANO, A.; RUIZ, J.; ARAMENDI, E.; LETURIONDO, L.A. "Evaluation of a new proposal for arcing fault detection method based on wavelet packet analysis", Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, vol. 3, pp.1328-1333, 2001.

LAZKANO, A.; RUIZ, J.; ARAMENDI, E.; LETURIONDO, L.A., "A New Approach to High Impedance Fault Detection Using Wavelet Packet Analysis," in Proc. IEEE 2000 Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power, p. 1005-1010, 2000.

LEE, S.J. et al. "An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems", IEEE Trans. Power Del., vol. 19, no. 2, p.z 524-532, 2004.

LIN, Y.H.; LIU, C.W. "A new dft-based phasor computation algorithm for transmission line digital protection," IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific, vol.3, p. 1733-1737, 2002.

BPA – Bonneville Power Administration. "Eletromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book", BPA, 483 pp, 1987.

MICHALIK, M.; BELKA, H. "Application of the continuous wavelet transform to intermittent high impedance ground fault detection in MV networks", Proc. 8th Inst. Elect. Eng. DPSP Conf.,vol. 2, p.473-476, 2004.

MOKHTARI, H.; AGHATEHRANI, R. "A new wavelet-based method for detection of high impedance fault". International Conference on Future Power Systems, 6 p., 2005.

MOMOH, J.A.; CHUKU, A.V.; DIAS, L.G.; ZHANG, Z.Z. "Integrated Detection and Protection Schemes for High Impedance Faults on Distribution Systems", IEEE Systems Man and Cybernetics conference, 1992.

MORALES-ESPANA, G et al., "Elimination of Multiple Estimation for Fault Location in Radial Power Systems by Using Fundamental Single-End Measurements," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, p. 1382-1389, 2009.

MORETO, M. Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma metodologia baseada em redes neurais artificiais. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

NAKAGOMI, R.M. Proposição de um Sistema de Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NAM, S.R.; PARK, J.K.; KANG, Y.C.; KIM, T.H. "A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP", Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, vol. 2, p.1175-1180, 2001.

SAHA, M.M.; DAS, R.; VERHO, P.; NOVOSEL, D. "Review of fault location techniques for distribution systems". Power Systems and Communications Infrastructures for the Future, Beijing, 2002.

SAHA, M.M.; PROVOOST, F.; ROSOLOWSKI, E. "Fault location method for MV cable network". DPSP, Amsterdam, p. 323-326, 2001.

SARLAK, M.; SHAHRTASH, S.M. "HIF detection using combination of MLPNNs based on multi-resolution morphological gradient features of currentwaveform", Inst. Eng. Technol. Gen. Transm.Distrib., vol. 5, no. 5, p. 588-595, 2011.

SARLAK, M.; SHAHRTASH, S.M. "High impedance fault detection in distribution networks using support vector machines based on wavelet transform". EPEC 2008. IEEE Canada Electric Power Conference, p. 1-6, 2008.

SHARAF, A.M.; SNIDER, L.A.; DEBNATH, K. "A Neural Network Based Back Error Propagation Relay Algorithm for Distribution System High Impedance Fault Detection". Advances in Power System Control, Operation and Management, Vol 2, pp. 613-620, 1993.

SIADATAN, A.; KAREGAR, H.K.; NAJMI, V. "New high impedance fault detection". IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), p. 573-576, 2010.

SILVA, I.N.; SPATTI, D.H.; FLAUZINO, R.A.. Redes Neurais Artificiais Para Engenharia e Ciências Aplicadas. São Paulo: ArtLiber, p.399, 2010.

SILVA, P.R.; JUNIOR, A. S.; JOTA, F.G "An intelligent system for automaqtic detection of high impedance faults in electrical distribution systems", Proceedings of the 38th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Vol. 1, p. 453-456, 1995.

SULTAN, A.F.; SWIFT, G.W.; FEDIRCHUK, D.J. " Detection of High Impedance Arcing Faults using A Multi-Layer Perceptron ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol: 7, No: 4, October 1992.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; YAMAUR, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T. "Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-101, no. 8, p. 2892-2898, 1982.

UMANS, S. D. "Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley", 7^a Edição, Editora Bookman, 2014

WAI, D.C.T.; YIBON, X. "A Novel Technique for High Impedance Fault Identification", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol: 13, No: 3, July, 1998.

WEG Brasil; "Folha de Dados – Motor Trifásico de Indução – Rotor de Gaiola", WEG Brasil, Julho de 2013.

XIANGJUN, Z.; LI, K.K.; CHAN, W.L. 'Wavelet Analysis Based Protection for High Impedance Ground Fault in Supply Systems', IEEE-PES/CSEE International Conference on Power System Technology (PowerCon 2002), Kunming China, p.275-279, 2002.

YANG, M.T.; GU, J.C.; JENG, C.Y.; KAO, W.S. "Detection high impedance fault in distribution feeder using wavelet transform and artificial neural networks", Proc. Int. Conf. Power System Technology, p.652-657, 2004.

ZAPPELINI, A.B. Análise de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

ZHU, J.; LUBKEMAN, D.L.; GIRGIS, A.A. "Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, p. 801-809, 1997.

APÊNDICE A – SISTEMA SIMULADO E ARQUIVO .ATP

Apresentam-se a seguir o sistema de distribuição simulado e o arquivo que ilustra a situação de regime permanente considerados via o *software* ATP.



BEGIN NEW DATA CASE C -----C Generated by ATPDRAW setembro, quarta-feira 24, 2014 C A Bonneville Power Administration program C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2009 C -----60. POWER FREQUENCY ALLOW EVEN PLOT FREQUENCY C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln> 1.E-6 .15 0 5 500 260 1 1 1 0 1 0 2 4 С 1 3 7 6 8 С 890 /BRANCH C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C > C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Lenq><>>0 TRANSFORMER X0005A 0 9999 3.7764260.441.38E5 1X0021A 2AA XX0006 .0186-1.29134500. 3X0007AX0007B .01872 1.29113800. TRANSFORMER X0005A X0005B 0 1X0021B 2AB XX0006 3X0007BX0007C TRANSFORMER X0005A X0005C 0 1X0021C 2AC XX0006 3X0007CX0007A X0025A 22536.25464. 0 X0025B 22536.25464. 0 X0025C 22536.25464. 0 22536.25464. X0050A 0 X0050B 22536.25464. 0 X0050C 22536.25464. 0 51X0051AX0008A 2.2018 15.579 1.6686 52X0051BX0008B 4.1076 53X0051CX0008C X0026A 22536.25464. 0 X0026B 22536.25464. 0 X0026C 22536.25464. 0 51X0008AX0028A 2.9358 20.772 52X0008BX0028B 2.2248 5.4768

53X0008CX0028C	
51X0028AX0029A	2.9358 20.772
52X0028BX0029B	2.2248 5.4768
53X0028CX0029C	
51x0036Ax0037A	.51351 2.25585
52X0036BX0037B	43352 53505
53X0036CX0037C	. 19992
51x0053ax0014a	5 1 3 7 6 3 6 3 5 1
52X0053RX0014R	3 8934 9 5844
52X0053BX0014B	5.0554 5.5044
53X0033CX0014C	
51X0036AX0038A	.6048 2.65689
52X0036BX0038B	.51059 .63017
53X0036CX0038C	
51X0044AX0045A	5.8/16 41.544
52X0044BX0045B	4.4496 10.9536
53X0044CX0045C	
X0029A	13915.15724.
0	
X0029B	13915.15724.
0	
X0029C	13915.15724.
0	
51x0030ax0031a	.64588 2.837358
52X0030BX0031B	.54527 .672974
53X0030CX0031C	
x0032ax0032B	2870 3241
0	2070. 5211.
v00228v00220	2070 2241
AUU32BAUU32C	2870. 3241.
U	0000 0041
X0032CX0032A	2870. 3241.
0	1 - 0 0 1 - 0 -
X0031AX0031B	1583. 1787.
0	
X0031BX0031C	1583. 1787.
0	
X0031CX0031A	1583. 1787.
0	
51X0032AX0031A	.79879 3.5091
52X0032BX0031B	.67437 .8323
53X0032CX0031C	
51X0031AX0033A	.43363 1.90494
52X0031BX0033B	.36608 .45182
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C	.36608 .45182
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A	.36608 .45182
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 52X0032CX0034C	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979.
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C X0034AX0034B 0	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979.
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B 0 x0034BX0034C	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979. 866. 979.
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B 0 x0034BX0034C 0	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979. 866. 979.
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B 0 x0034BX0034C 0 x0034CX0034A	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979. 866. 979. 866. 979.
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B 0 x0034BX0034C 0 x0034CX0034A 0	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979. 866. 979. 866. 979.
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B 0 x0034BX0034C 0 x0034CX0034A 0 51X0009AX0033A	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979. 866. 979. 866. 979. .66186 2.90754
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B 0 x0034BX0034C 0 x0034CX0034A 0 51X0009AX0033A 52X0009BX0033B	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979. 866. 979. 866. 979. .66186 2.90754 .55876 .68962
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B 0 x0034BX0034C 0 x0034CX0034A 0 51X0009AX0033A 52X0009BX0033B 53X0009CX0033C	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979. 866. 979. 866. 979. .66186 2.90754 .55876 .68962
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B 0 x0034BX0034C 0 x0034CX0034A 0 51X0009AX0033A 52X0009BX0033B 53X0009CX0033C x0009AX0009B	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979. 866. 979. 866. 979. .66186 2.90754 .55876 .68962 2701. 3053.
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B 0 x0034BX0034C 0 x0034CX0034A 0 51X0009AX0033A 52X0009BX0033B 53X0009CX0033C x0009AX0009B 0	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979. 866. 979. 866. 979. .66186 2.90754 .55876 .68962 2701. 3053.
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B 0 x0034BX0034C 0 x0034CX0034A 0 51X0009AX0033A 52X0009BX0033B 53X0009CX0033C x0009AX0009B 0 x0009BX0009C	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979. 866. 979. 866. 979. .66186 2.90754 .55876 .68962 2701. 3053. 2701. 3053.
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B 0 x0034BX0034C 0 x0034CX0034A 0 51X0009AX0033A 52X0009BX0033B 53X0009CX0033C x0009AX0009B 0 x0009BX0009C	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979. 866. 979. 866. 979. .66186 2.90754 .55876 .68962 2701. 3053. 2701. 3053.
52X0031BX0033B 53X0031CX0033C 51X0033AX0034A 52X0033BX0034B 53X0033CX0034C x0034AX0034B 0 x0034BX0034C 0 x0034CX0034A 0 51X0009AX0033A 52X0009BX0033B 53X0009CX0033C x0009BX0009B 0 x0009BX0009C 0 x0009CX0009A	.36608 .45182 .05706 .25065 .04817 .05945 866. 979. 866. 979. 866. 979. .66186 2.90754 .55876 .68962 2701. 3053. 2701. 3053.

4.76235 1.0841 51X0035AX0036A .91521 52X0035BX0036B 1.12955 53X0035CX0036C X0036AX0036B 2534. 2862. 0 X0036BX0036C 2534. 2862. 0 X0036CX0036A 2534. 2862. 0 51X0040AX0041A 1.0498 4.61196 1.09388 52X0040BX0041B .88631 53X0040CX0041C X0037AX0037B 5115. 5780. 0 X0037BX0037C 5115. 5780. 0 X0037CX0037A 5115. 5780. 0 51X0039AX0040A 1.0498 4.61196 52X0039BX0040B .88631 1.09388 53X0039CX0040C X0038AX0038B 2059. 2326. 0 2059. 2326. X0038BX0038C 0 2059. 2326. X0038CX0038A 0 X0011A 1.E6 TRANSFORMER 1 9999 1X0010AXX0012 18.318452. 2X0001AX0001B 2.91813800. TRANSFORMER X0011A X0011B 1 1X0010BXX0012 2X0001BX0001C TRANSFORMER X0011A X0011C 1 1X0010CXX0012 2X0001CX0001A 51X0042AX0043A .32636 1.433718 .27553 .340054 52X0042BX0043B 53X0042CX0043C 9690.10950. X0040AX0040B 0 X0040BX0040C 9690.10950. 0 X0040CX0040A 9690.10950. 0 51X0043AX0013A .32636 1.433718 .27553 .340054 52X0043BX0013B 53X0043CX0013C 9690.10950. X0041AX0041B 0 X0041BX0041C 9690.10950. 0 X0041CX0041A 9690.10950. 0 X0041AX0041B 745. 841. 0

X0041BX0041C	745. 841.
0	745 841
0	/15. 011.
X0043AX0043B 0	6040. 6825.
X0043BX0043C	6040. 6825.
X0043CX0043A	6040. 6825.
51X0020AX0021A	.735 15.164
52X0020BX0021B	1.1205 17.229
53X0020CX0021C	
51X0050AX0025A	3.6698 25.965
52X0050BX0025B	2.781 6.846
53X0050CX0025C	
X0013AX0013B	895. 1010.
0	
X0013BX0013C	895. 1010.
x0013CX0013A	895. 1010.
X0013AX0013B	2265. 2557.
x0013Bx0013C	2265. 2557.
x0013Cx0013A	2265. 2557.
X0014A	16934.19136.
x0014B	16934 19136
0	10/31.1/130.
x0014C	16934.19136.
51X0014AX0044A	5.8716 41.544
52X0014BX0044B	4,4496 10,9536
53X0014CX0044C	101100 100000
X0028A	13915 15724
0	13913.13721.
x0028B	13915 15724
0	13913.13721.
x0028C	13915.15724.
x0044A	16934.19136.
x0044B	16934.19136.
x0044C	16934.19136.
X0008A	10015 15504
0	13915.15724.
0 X0008B	13915.15724. 13915.15724.
0 x0008B 0	13915.15724.
0 x0008B 0 x0008C 0	13915.15724. 13915.15724. 13915.15724.
0 x0008B 0 x0008C 0 x0045A 0	13915.15724. 13915.15724. 13915.15724. 16934.19136.
0 x0008B 0 x0008C 0 x0045A 0 x0045B 0	13915.15724. 13915.15724. 13915.15724. 16934.19136. 16934.19136.
0 x0008B 0 x0008C 0 x0045A 0 x0045B 0 x0045C 0	13915.15724. 13915.15724. 13915.15724. 16934.19136. 16934.19136. 16934.19136.

TX0001 1.E5 TRANSFORMER 0 9999 1X0001CXX0048 44.53 13.8 2X0002CXX0049 44.53 13.8 TRANSFORMER TX0002 1.E5 0 9999 1X0001BXX0047 44.53 13.8 2X0002BXX0048 44.53 13.8 TRANSFORMER TX0003 1.E5 0 9999 44.53 13.8 1X0001AXX0049 2X0002AXX0047 44.53 13.8 44.53 13.8 3.6698 25.965 51X0024AX0050A 52X0024BX0050B 2.781 6.846 53X0024CX0050C TRANSFORMER TX0004 1.E5 0 9999 1X0003CXX0056 44.53 13.8 2X0004CXX0055 16.79 13.8 TRANSFORMER TX0005 1.E5 0 9999 1X0003BXX0054 44.53 13.8 44.53 13.8 2X0004BXX0056 TRANSFORMER TX0006 1.E5 0 9999 44.53 13.8 1X0003AXX0055 44.53 13.8 2X0004AXX0054 3.8899 27.5229 51X0025AX0026A 52X0025BX0026B 2.9479 7.25676 53X0025CX0026C X0057A .22286 0 X0057B .22286 0 X0057C .22286 0 X0059A .4457 0 X0059B .4457 0 X0059C .4457 0 X0058A .66857 0 .66857 X0058B 0 .66857 X0058C 0 X0060A .22286 0 .22286 X0060B 0 .22286 X0060C 0

•	X0062A			1.3371				
0	X0062B			1.3371				
	X0062C			1.3371				
0	X0061A			.66857				
0	X0061B			.66857				
0	X0061C			.66857				
1	TRANSFORMER			X0019A	1.E6			
1	999 1X0017AXX0015 2X0003AX0003B TRANSFORMER X	9 0019A	26. 12.	36618843. 65313800. X0019B				
1	LX0017BXX0015 2X0003BX0003C TRANSFORMER X	0019A		X0019C				
5 5 5 5 7 5 7	LX0017CXX0015 2X0003CX0003A LX0022AX0052A 2X0022BX0052B 3X0022CX0052C SWITCH		9.5375 6.44	89.68225 21.9555				
C	< n 1>< n 2>< X0023AX0024A	Tclose ><	Top/Tde ><	Ie ><	Vf/CLOP	>< MEA	type > SURING	>
T	X0023BX0024B					MEA	SURING	
1	X0023CX0024C					MEA	SURING	
T	X0022AX0023A	1.	1.E3					
0	X0022BX0023B	1.	1.E3					
0	X0022CX0023C	1.	1.E3					
1	AA X0052A					MEA	SURING	
1	AB X0052B					MEA	SURING	
1	AC X0052C					MEA	SURING	
1	XX0006					MEA	SURING	
0	X0022AX0027A	1.	1.E3					
0	X0022BX0027B	1.	1.E3					
0	X0022CX0027C	1.	1.E3					
1	X0027AX0051A					MEA	SURING	
1	X0027BX0051B					MEA	SURING	

X0027CX0051C

1			
0	X0003AX0030A	-1.	1.E3
0	X0003BX0030B	-1.	1.E3
0	X0003CX0030C	-1.	1.E3
0	X0003AX0035A	-1.	1.E3
0	X0003BX0035B	-1.	1.E3
0	X0003CX0035C	-1.	1.E3
0	X0001AX0039A	-1.	1.E3
0	X0001BX0039B	-1.	1.E3
0	X0001CX0039C	-1.	1.E3
0	X0001AX0042A	-1.	1.E3
1	X0001BX0042B	-1.	1.E3
1	X0001CX0042C	-1.	1.E3
1	X0029AX0046A	-1.	1.E3
0	X0029BX0046B	-1.	1.E3
0	X0029CX0046C	-1.	1.E3
0	X0046AX0053A		
1	X0046BX0053B		
1	X0046CX0053C		
1	X0002A		
1	X0002B		
1	X0002C		
1	XX0015		
1	X0004A		
1	X0004B		
1	X0004C		
1	X0016AX0017A		
1	X0016BX0017B		
1	X0016CX0017C		
1	X0022AX0016A	1.	1.E3

0

MEASURING MEASURING MEASURING MEASURING MEASURING MEASURING MEASURING MEASURING MEASURING

MEASURING

150

~	X0022BX001	6B	1.	1	.E3							
0	X0022CX001	-6C	1.	1	.E3							
0	X0003AX005	57A	1.	1	.E3							
0	X0003BX005	57B	1.	1	.E3							
0	X0003CX005	57C	1.	1	.E3							
0	X0003AX005	58A	1.	1	.E3							
0	X0003BX005	58B	1.	1	.E3							
0	X0003CX005	58C	1.	1	.E3							
0	X0003AX005	59A	.05	1	.E3							
0	X0003BX005	59B	.05	1	.E3							
0	X0003CX005	59C	.05	1	.E3							
0	X0001AX006	50A	1.	1	.E3							
0	X0001BX006	50B	1.	1	.E3							
0	X0001CX006	50C	1.	1	.E3							
0	X0001AX006	51A	1.	1	.E3							
0	X0001BX006	51B	1.	1	.E3							
0	X0001CX006	51C	1.	1	.E3							
0	X0001AX006	52A	1.	1	.E3							
0	X0001BX006	52B	1.	1	.E3							
0	X0001CX006	52C	1.	1	.E3							
1	X0018AX001	.0A							MEASU	JRING		
1	X0018BX001	0B							MEASU	JRING		
1	X0018CX001	.0C							MEASU	JRING		
T T	X0029AX001	.8A	-1.	1	.E3							
0	X0029BX001	8B	-1.	1	.E3							
0	X0029CX001	-8C	-1.	1	.E3							
1	XXOC)12							MEAS	JRING		
1 / S	SOURCE	7 mm 7					ד ד		m1	ъ <i>с</i> по		
	< 11 1><>< STOP >	Ampi. ><	rred.	><]	enase	/10><	AL	><	Τ⊥	>< TS	1 AK'I' >	<
1(14	11 10. 11 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12	2676.528		60.	_	120.					-1.	

14X0020C 112676.528 60. -240. 100. /OUTPUT AA AB AC X0021AX0021BX0021CX0001AX0001BX0001C BLANK BRANCH BLANK SWITCH BLANK SOURCE BLANK OUTPUT BLANK PLOT BEGIN NEW DATA CASE BLANK -1.