UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DANILO SINKITI GASTALDELLO

METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS EM REDES SUBTERRÂNEAS INTEGRANDO PSCAD/EMTDC E SISTEMAS INTELIGENTES

BAURU
2012

DANILO SINKITI GASTALDELLO

METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS EM REDES SUBTERRÂNEAS INTEGRANDO PSCAD/EMTDC E SISTEMAS INTELIGENTES

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia de Bauru, da Universidade Estadual Paulista.

Orientador: Prof. Dr. André Nunes de Souza

BAURU
2012

Gastaldello, Danilo Sinkiti.
Metodologia de Localização de Defeitos em Redes Subterrâneas Integrando PSCAD/EMTDC e Sistemas Inteligentes / Danilo Sinkiti Gastaldello, 2012.
119 f.

Orientador: André Nunes de Souza

Dissertação (Mestrado)–Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012

1. Linhas Subterrâneas. 2. Distribuição de Energia. 3. Ferramentas Computacionais. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE BAURU
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE DANILO SINKITI GASTALDELLO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 03 dias do mês de agosto do ano de 2012, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. HÉLIO EIJI SUETA do(a) Instituto de Eletrotécnica e Energia / Universidade de São Paulo - USP, Prof. Dr. PEDRO DA COSTA JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a argüição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de DANILO SINKITI GASTALDELLO, intitulado "METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS EM REDES SUBTERRÂNEAS INTEGRANDO PSCAD/EMTDC E SISTEMAS INTELIGENTES". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA

Prof. Dr. HÉLIO EIJI SUETA

Prof. Dr. PEDRO DA COSTA JUNIOR

Dedico este trabalho com todo carinho
aos meus pais que me incentivaram e que me
deram total apoio para a concretização
desta conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me dar a oportunidade de vida, me abençoando com muita saúde, com uma família maravilhosa que sempre me apoiou, e com pessoas especiais que foram colocadas em minha vida durante minha fase acadêmica, pessoas que estiveram ao meu lado nos momentos bons e ruins que passei.

Agradeço ao Prof. Dr. André Nunes de Souza que me orientou e foi muito paciente comigo durante todos esses anos, desde 2008, quando começamos a trabalhar juntos no laboratório LSISPOTI, após um desabafo que tive com ele durante a matéria de Medidas Elétricas, aonde iniciou-se uma amizade e um compromisso profissional que vêm colhendo frutos na produção científica.

Em especial quero agradecer todos os meus colegas de trabalho do LSISPOTI, que considero como irmãos: Caio, Lucas, Renato, Alexandre, João, Karila, Alexandre, Ariadne, Daniele, Jefferson, Jonatas, Wallace, Haroldo, Gabriele, Carolina, Gabriel, Júlio e Tiago, pela contribuição, companhia e pela amizade em todos os momentos bons e difíceis que tivemos para cumprir todos os cronogramas.

Agradeço ao CNPq e à FAPESP pelo incentivo e apoio financeiro dado para a execução deste trabalho de mestrado.

E por fim, agradeço muito minha família, em especial aos meus pais, Ayrton e Luiza, pela compreensão, incentivo e apoio que tiveram comigo durante o desenvolvimento deste trabalho, meu irmão e irmã, Daniel e Juliana, que sempre me incentivaram a continuar estudando e à minha namorada Cássia Hiromi Yamamoto que teve muita paciência comigo e me mostrou a importância de organização e motivação, que foram fundamentais para o término deste trabalho.

RESUMO

Com a modernização da sociedade e o grande crescimento tecnológico visto nos últimos anos, é difícil de imaginar a ausência da energia elétrica nos dias atuais, pois tudo depende da energia para funcionar. A energia elétrica é fundamental para todos os setores da sociedade: residencial, comercial e industrial. A qualidade de seu fornecimento também é muito importante, pois é a qualidade que garante o correto funcionamento de todos os processos realizados no dia-a-dia. No entanto, nenhum sistema, por melhor que seja, é imune à ocorrências de faltas. Assim sendo, uma boa monitoração destas faltas é necessária para realização de manobras de correção mais eficientes. Além disso, a crescente preocupação ambiental faz com que as concessionárias busquem melhores formas de levar a energia à população, com redes mais seguras, mais confiáveis e também mais baratas. Os sistemas subterrâneos têm demonstrado ser uma boa solução no que diz respeito à segurança, confiabilidade e preocupação ambiental, porém a sua instalação ainda é muito cara em comparação com as redes aéreas convencionais. Como todos os sistemas, as redes subterrâneas também estão sujeitas a defeitos. A correta localização da falta (defeito) em cabos subterrâneos de distribuição de energia elétrica não é uma tarefa trivial. Além da dificuldade de acesso ao sistema, existe o alto custo das medições dos parâmetros e a necessidade de uma análise de um especialista dos sinais medidos, ocasionando erros que têm se mostrado custosos. A proposta desta dissertação consiste em estudar os sistemas subterrâneos através de ferramentas computacionais e desenvolver um sistema inteligente que auxilie com a precisão de localização de faltas em cabos subterrâneos de distribuição de energia elétrica.

Palavras-chave: Linhas Subterrâneas, Distribuição de Energia e Ferramentas Computacionais.

ABSTRACT

With the modernization of society and the great technological growth in the last years, it is hard to imagine the absence of electric power nowadays, because everything depends on energy to work. Electricity is fundamental to all sectors of society: residential, commercial and industrial. The quality supply is also very important, since quality guarantees the correct functioning of all processes performed in a daily basis. However, no system is immune to the occurrence of faults. Therefore, a good monitoring of these faults is necessary for more efficient correction adjustments. In addition, the growing environmental concerns make the power utilities to find better ways to take energy to the population, through safer more reliable and also cheaper networks. The underground system has be found to be a good approach to improve safety, reliability and environmental features, but its installation is still very expensive when compared to conventional overhead systems. Like any system, the underground networks are subjects to defects. The correct fault localization (defect) in eletricity distribution underground networks is not a trivial task, it is not just due to a difficult system access, the high cost of measurements of the parameters and the required expert analysis of the measured signals. These factors are source of errors that have proven costly. The purpose of this dissertation is to study underground systems using computational tools and develop an intelligent system to accurately assist to locating of faults in underground cables of power distribution networks.

Keywords: Underground Lines, Power Distribution and Computational Tools.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Calçadas de Nova Iorque (Século XX) 15

Figura 2.2 – Calçadas de Nova Iorque (2011)..... 16

Figura 2.3 – Ruas de Visconde de Guarapuava (Paraná) com Rede Aérea de Energia..... 17

Figura 2.4 – Ruas de Visconde de Guarapuava (Paraná) com Rede Subterrânea de Energia.. 17

Figura 2.5 – Configuração Básica de Sistemas Subterrâneos 18

Figura 2.6 – Câmara Transformadora Subterrânea (Adaptado de LIGHT, 2011) 20

Figura 2.7 – Composição dos Sistemas Subterrâneos (Adaptado de LIGHT, 2011) 20

Figura 2.8 – Problemas Encontrados nos Sistemas Subterrâneos (Adaptado de LIGHT, 2011) 22

Figura 2.9 – Sistema Radial Simples 23

Figura 2.10 – Sistema em Anel Aberto (a) e Fechado (b) 24

Figura 2.11 – Sistema Reticulado Dedicado ou Exclusivo 24

Figura 2.12 – Formas Típicas do Fenômeno *Water-Treeing* (GULSKI, et. al., 2008)..... 36

Figura 2.13 – Modelos Básicos de Faltas..... 37

Figura 2.14 – Imagem de Ensaio TDR Cabo sem Defeito..... 40

Figura 2.15 – Imagem de Ensaio TDR Cabo com Defeito 40

Figura 2.16 – Comparação de Magnitude entre Duas Linhas Paralelas 41

Figura 2.17 – Comparação Diferencial para Uma Linha 41

Figura 2.18 – A Constituição Básica de um Gerador de Onda (CLEGG, 1993) 45

Figura 2.19 – Laboratório Móvel no Local de Ensaio (SOUZA et. al., 2011)..... 47

Figura 2.20 – Esquema Proposto para Localização de Falhas Utilizando Redes Neurais Artificiais e Técnicas de Janelamento Fixo do Sinal (SOUZA et. al., 2011)..... 48

Figura 3.1 – Representação de uma Rede *FeedForward* Multicamadas (HAYKIN, 2001).... 53

Figura 3.2 – Representação dos Passos *Forward* e *Backward*..... 54

Figura 3.3 – Divisão dos Métodos de Treinamento (SHEPHERD, 1997)..... 55
Figura 3.4 – Função Degrau Binária..... 56
Figura 3.5 – Função Degrau Bipolar..... 57
Figura 3.6 – Função Rampa..... 57
Figura 3.7 – Função Sigmóide..... 58
Figura 3.8 – Função Tangente Hiperbólica..... 58
Figura 3.9 – Diagrama Básico de uma Rede RBF..... 59
Figura 3.10 – Arquitetura da Rede GRNN..... 60
Figura 3.11 – Arquitetura Básica de uma Rede PNN..... 62
Figura 4.1 – Modelo de um Circuito Equivalente de um Cabo Subterrâneo de Seção Simples..... 65
Figura 4.2 – Seção Transversal do Cabo Utilizado na Simulação..... 66
Figura 4.3 – Falta do Núcleo para a Terra..... 68
Figura 5.1 – Circuito Simulado para Levantamento de Dados..... 78
Figura 5.2 – Configuração da Falta..... 79
Figura 5.3 – Configuração do Medidor de Valores RMS..... 79
Figura 5.4 – Gráfico da Forma de Onda RMS..... 80
Figura 5.5 – Gráfico do Erro das Amostras para cada Rede Neural Ensaiada..... 82
Figura 5.6 – Gráfico de Barras do Erro Médio de cada Rede Neural Ensaiada..... 82
Figura 5.7 – Gráfico de Erros de cada Tipo de Treinamento Variando a Quantidade de Dados de Treinamento..... 84
Figura 5.8 – Gráfico de Barras do Erro Médio de cada Tipo de Treinamento Variando a Quantidade de Dados de Treinamento..... 85
Figura 5.9 – Arquitetura Neural Implementada com uma Saída..... 86
Figura 5.10 – Avaliação do Cabo de 800 m..... 90
Figura 5.11 – Avaliação do Cabo de 1000 m..... 90
Figura 5.12 – Erros para o Cabo de 1000 m..... 92

Figura 5.13 – Erros para o Cabo de 1500 m..... 92
Figura 5.14 – Erros para o Cabo de 2000 m..... 92
Figura 5.15 – Erros para o Cabo de 3000 m..... 93
Figura 5.16 – Erros para Local de Falta em 400 m..... 93
Figura 5.17 – Erros para Local de Falta em 800 m..... 94
Figura 5.18 – Erros para Local de Falta em 1400 m..... 94
Figura 5.19 – Erros para Local de Falta em 2100 m..... 94
Figura 5.20 – Nova Arquitetura Neural Implementada com duas Saídas..... 97
Figura 5.21 – Resultados da Rede para Local da Falta..... 98
Figura 5.22 – Resultados da Rede para Resistência de Falta..... 98
Figura 5.23 – Gráfico da Regressão da Rede..... 99
Figura 5.24 – Gráfico dos Erros para cada Configuração de Dados de Entrada..... 100
Figura 5.25 – Gráfico de Barras do Erro Médio para cada Configuração de Dados de Entrada 101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2 – Composição das Redes Urbanas no Brasil 30

Tabela 2.3 – Composição das Redes Rurais no Brasil..... 30

Tabela 2.4 – Composição das Redes em Outros Lugares do Mundo 30

Tabela 4.1 – Parâmetros de Configuração do Cabo..... 66

Tabela 5.1 – Valores de Localização de Falta e Erros Obtidos (GASTALDELLO et.al., 2011) 77

Tabela 5.2 – Alguns Valores do Banco de Dados de 326 Amostras 81

Tabela 5.3 – Erro Médio para Cada Tipo de Treinamento de Rede 83

Tabela 5.4 – Banco de Dados com 30 Amostras para Teste 87

Tabela 5.5 – Banco de Dados Teste..... 88

Tabela 5.6 – Dados para Avaliação com Banco de 326 Amostras 88

Tabela 5.7 – Dados para Avaliação com Banco de 458 Amostras 89

Tabela 5.8 – Comparação Algoritmo e RNA para Local da Falta..... 95

Tabela 5.9 – Resultado da RNA para Resistência de Falta 96

Tabela 5.10 – Resultados da RNA Completa Implementada 99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D Analógico/Digital

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

AVI – *Audio Video Interleave* - formato de arquivo encapsulador de áudio e vídeo

BT – Baixa tensão

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CI – Caixa de Inspeção

CP – Caixa de Passagem

CPC – Cabos Cobertos Fixados em Espaçadores

CSV – *Comma-Separated Values* - formato de arquivo que armazena dados tabelados

CT – Câmara Transformadora

DEC – Duração da Interrupção Média do Fornecimento de Energia, a cada Consumidor

EDP – Equações Diferenciais Primárias

EPR – Etileno-Propileno

FEC – Frequência Média de cada Interrupção

GIF – *Graphics Interchange Format* - formato de arquivo para intercâmbio de gráficos

GRNN – *General Regression NeuralNetworks*

HVDC – Corrente Contínua em Alta Tensão

JPEG – *Join Photographic Expert Group* - formato de arquivo usado para comprimir imagens

MLF – *Multi-Layer FeedForward*

MLP – *Multi-Layer Perceptron*

MNDs – Métodos Não Destrutivos

MT – Média Tensão

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PNN – *Probabillistic Neural Networks*

PR-AB – Cabos XLPE Instalados Diretamente Enterrados

PR-DT – Cabos XLPE Instalados em Dutos

RBF – *Radial Basis Functions*

RDA – Rede de Distribuição Aérea

RDS – Rede de Distribuição Subterrânea

RF – Rádio Frequência

RMS – *Root Mean Square* – Valor Eficaz

RNA – Redes Neurais Artificiais

SVM – *Support Vector Machines* (Máquinas de Vetores de Suporte)

TDR – *Time Domain Reflectometers* - Reflectometros no Domínio do Tempo

TMA – Tempo de Restabelecimento

TW – Transformada *Wavelets*

XLPE – Polietileno Termofixo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
1.1 Motivação 11
1.2 Objetivo 12
1.3 Estrutura 13
2 INVESTIGAÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA 14
2.1 Breve Histórico das Redes Subterrâneas 14
2.2 Características das Redes Subterrâneas 17
2.2.1 Rede Primária 18
2.2.2 Rede Secundária 18
2.2.3 Composição das Redes Subterrâneas 19
2.2.4 Tipologia dos Incidentes nas Redes Subterrâneas 21
2.2.5 Compartilhamento do Subsolo 21
2.2.6 Métodos de Escavação e Passagem dos Fios 22
2.2.7 Tipos de Sistema Subterrâneo 23
2.3 Viabilidade Econômica de Instalação de Redes Subterrâneas 24
2.3.1 Aplicações da Distribuição de Energia Elétrica no Brasil 26
2.3.2 Aspectos Técnicos 27
2.3.3 Aspectos Urbanísticos e Regulatórios 28
2.3.4 Aspectos Econômicos 28
2.3.5 Distribuição das Redes no Brasil e no Mundo 29
2.3.6 Análise de Custos 30
2.4 Métodos de Localização de Faltas 31
2.4.1 O Conceito de Falha 34
2.4.2 Tipos de Falhas em Cabos Subterrâneos 35
2.4.3 Modelos de Faltas 37
2.4.4 Métodos de Detecção de Faltas em Cabos Subterrâneos 37
3 PARTICULARIDADES DO PSCAD/EMTDC, DO MATLAB E DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS 49
3.1 PSCAD 49
3.2 MATLAB 50
3.3 Redes Neurais 51

3.3.1 Comparação entre Redes Neurais e Métodos Estatísticos 51
3.3.2 Tipos de Redes Neurais 52
3.3.3 Redes Multi-Layer FeedForward 52
3.3.4 Redes de Base Radial 59
3.3.5 Redes Neurais de Regressão Generalizadas 60
3.3.6 Redes Neurais Probabilísticas 61
3.3.7 Comparação entre Redes MLP, RBF, GRNN/PNN 62
4 METODOLOGIA 64
4.1 Estudo da Localização da Falta através do Algoritmo Proposto em XIA YANG, 2008 65
4.1.1 Variação da Resistência de Falta 69
4.1.2 Variação da Distância da Falta 69
4.1.3 Variação do Comprimento do Cabo 70
4.2 Criação de Banco de Dados: Falta Monofásica Fase-Terra, com Cabo Simples e com Resistência de Falta Fixa 70
4.3 Avaliação de Redes Neurais: MLP, RBF, GRNN e PNa 71
4.4 Avaliação de Configuração das RNA 71
4.5 Avaliação da Quantidade de Dados de Treinamento para cada Tipo de Treinamento da RNA 72
4.6 Obtenção do Banco de Dados Teste e Discussão dos Resultados 72
4.7 Análise da Influência dos Dados de Entrada 72
4.8 Comparação: Rede Neural X Algoritmo Proposto em XIA YANG, 2008 73
4.9 Saída da RNA: Resistência de Falta 73
4.10 Duas Saídas: Local da Falta e Resistência de Falta 74
4.11 Avaliação do Desempenho da Variação da Quantidade de Dados de Entrada 74
5 SIMULAÇÕES COM PSCAD/EMTDC E VALIDAÇÕES DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS 75
5.1 Estudo do Problema através do Algoritmo Proposto em XIA YANG, 2008 75
5.1.1 Variação de Resistência de Falta 75
5.1.2 Variação do Local da Falta 76
5.1.3 Variação do Comprimento Total do Cabo 76
5.1.4 Resumo dos Resultados 77
5.2 Criação de Banco de Dados: Falta Monofásica Fase-Terra, com Cabo Simples e com Resistência de Falta Fixa 78

5.2.1 Resumo dos Resultados 81
5.3 Avaliação de Redes Neurais: MLP, RBF, GRNN e PNN 81
5.3.1 Resumo do Resultados 83
5.4 Avaliação de Configuração das RNA 83
5.4.1 Resumo dos Resultados 83
5.5 Avaliação da Quantidade de Dados de Treinamento para cada Tipo de Treinamento da RNA 84
5.5.1 Resumo dos Resultados 85
5.6 Escolha da Melhor Rede Simulada e Discussão dos Resultados 85
5.6.1 Resumo dos Resultados 91
5.7 Análise da Influência dos Dados de Entrada 91
5.7.1 Resumo dos Resultados 95
5.8 Comparação: Rede Neural X Algoritmo Proposto em XIA YANG, 2008 95
5.8.1 Resumo dos Resultados 95
5.9 Saída da RNA: Resistência de Falta 96
5.9.1 Resumo dos Resultados 96
5.10 Duas Saídas: Local da Falta e Resistência de Falta 97
5.10.1 Resumo dos Resultados 100
5.11 Avaliação do Desempenho da Variação da Quantidade de Dados de Entrada 100
5.11.1 Resumo dos Resultados 101
6 CONCLUSÃO 102
6.1 Conclusões Gerais 102
6.2 Trabalhos Futuros 103
6.3 Publicações Durante a Pesquisa 103
AGRADECIMENTOS 107
REFERÊNCIAS 108

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A crescente preocupação com o futuro da humanidade fez com que se aumentassem as regulamentações ambientais. As concessionárias de energia então perceberam a necessidade de se investir em novos meios de distribuir a energia elétrica de forma mais segura e ecologicamente correta. Neste contexto surgiram os sistemas subterrâneos de distribuição de energia elétrica, que tem como principais vantagens a preocupação ambiental, com a diminuição de podas de árvores; a diminuição da poluição visual, uma vez que os cabos ficam enterrados; e também a segurança, afinal de contas somente as pessoas autorizadas é que tem acesso aos cabos, o que evita muitos acidente. Mas nenhum sistema é perfeito, embora os cabos enterrados apresentem muitas vantagens, a localização de faltas e a manutenção de defeitos são difíceis e custosas (GASTALDELLO et.al., 2011).

A localização da falta em um segmento de um sistema de cabos subterrâneos exige aspectos mais amplos de reflexão e análise. Ao contrário das linhas aéreas, os cabos subterrâneos têm como características: indutâncias menores e capacitâncias maiores. A análise torna-se complicada quando vários tipos de cabos subterrâneos são usados e várias topologias de circuito são aplicadas, como radial, em anel, ou reticulada. Para analisar tais sistemas e configurações, impedâncias e admitâncias mútuas entre estes condutores devem ser consideradas no circuito analisado. Isto complica o aspecto analítico de identificação da falta no segmento. Além deste problema de manutenção, outra coisa que ainda impede a aplicação de sistemas subterrâneos é o alto investimento inicial de instalação da rede. Outro problema é a falta de regulamentação das empresas de distribuição de energia, gás, telecomunicações, entre outras, sobre os níveis de profundidade que cada modalidade deve seguir. Além disso, as concessionárias e o órgão regulador (ANEEL) ainda discutem como deve ser realizada a distribuição dos gastos com a implementação das redes subterrâneas.

Atualmente, as redes subterrâneas são encontradas principalmente nos centros de grandes cidades, em condomínios fechados, e em grandes centros empresariais que exigem uma confiabilidade maior no fornecimento da energia, pois possuem cargas importantes que não podem ser desligadas. Para minimizar os custos de implantação, atualmente, as redes subterrâneas de energia, de gás e de telecomunicações são planejadas em conjunto, fato este, vem aumentando o atrativo comercial deste sistema.

Estudos realizados demonstram que os gastos, por exemplo, com podas de árvores, durante a manutenção das redes aéreas de distribuição, já estão compensando o maior valor de investimento de instalação das redes subterrâneas, uma vez que esta não exige as podas de árvores, e, além disso, incentivam a arborização do local.

Diante do exposto, os grandes problemas para aplicação deste sistema são: do ponto de vista político é o acordo de como será dividido os gastos da implantação das redes subterrâneas, e da regulação das áreas de atuação de cada empresa distribuidora; do ponto de vista técnico é a correta identificação do local da falta para tornar a realização do reparo muito mais econômica e eficaz. A forma convencional de detectar a falta exige uma pesquisa exaustiva em grande escala, consumindo muito tempo e recursos humanos. Assim, o tempo de restauração pode variar dependendo da confiabilidade da informação da interrupção. Portanto, novas propostas de análise do sistema e novas metodologias de localização de faltas se tornam necessárias para aplicação dos sistemas subterrâneos de energia elétrica.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho foi integrar o software PSCAD/EMTDC e ferramentas inteligentes para auxiliar na localização de faltas em cabos de redes subterrâneas de distribuição de energia, diminuindo o tempo de restauração na ocorrência de um problema, aumentando assim a confiabilidade do sistema, melhorando diretamente os índices DEC e FEC (duração e frequência da falta).

O sistema inteligente (baseado em redes neurais artificiais) foi implementado em ambiente MATLAB a partir de dados de simulações feitas no software PSCAD/EMTDC de forma supervisionada, sendo capaz de retornar como resposta: o local da falta e a resistência de falta, tendo como entrada as tensões e correntes, com seus valores RMS e comprimento do cabo.

Neste trabalho optou-se em estudar problemas de falta fase-terra em uma única fase, uma vez que segundo as concessionárias de energia, este tipo de problema é o mais frequente. Foram também avaliadas as influências da variação dos parâmetros (comprimento do cabo, local da falta e resistência de falta) na eficiência das redes neurais artificiais.

1.3 Estrutura

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos:

- O Capítulo 2 – INVESTIGAÇÃO TÉCNICO CIENTÍFICA, apresenta um histórico das redes subterrâneas, uma discussão de algumas características das redes subterrâneas e uma investigação científica dos métodos de detecção de falhas neste tipo de sistema;
- O Capítulo 3 – PARTICULARIDADES DO PSCAD/EMTDC, DO MATLAB E DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS, consistem no registro do estudo realizado das particularidades dos softwares utilizados nesta pesquisa (PSCAD e MATLAB), bem como das redes neurais artificiais que foram implementadas neste trabalho;
- O Capítulo 4 – METODOLOGIA E PROPOSTA DE TRABALHO apresentam de forma detalhada a metodologia aplicada neste trabalho para a análise do problema de localização de falta em sistemas subterrâneos;
- O Capítulo 5 – SIMULAÇÕES COM PSCAD/EMTDC E VALIDAÇÕES DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS, expõem os dados obtidos através da metodologia exposta no capítulo anterior, com tabelas e figuras e discussão dos resultados; e
- O Capítulo 6 – CONCLUSÃO apresenta as conclusões desta pesquisa, algumas sugestões de trabalhos futuros e os trabalhos que foram publicados durante o desenvolvimento deste trabalho.

2 INVESTIGAÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

2.1 Breve Histórico das Redes Subterrâneas

Logo após o invento do dínamo e da lâmpada elétrica, em 1879, Brasil, Europa e Estados Unidos deram início ao uso de energia elétrica. O primeiro fornecimento comercial de energia elétrica foi através de um sistema subterrâneo instalado na cidade de Nova Iorque em 1882 por Thomas Edison. Este sistema de 100 V em corrente contínua, consistia-se por pesadas barras de cobre, envolvidos por tubos de fibra enterrados no chão. Os altos custos da construção, das perdas e queda de tensão, assim como, a distância das fontes de geração, restringiram a difusão e o desenvolvimento nos primeiros anos dos sistemas elétricos.

Em 1886 teve aplicação do primeiro transformador em Great Barrington, Massachusetts (PANSINI et. al., 1993) com o uso de sistemas de distribuição de energia em 1000 V em CA e a aplicação de transformadores para atendimento de consumidores em níveis de tensão mais seguros, próximos da tensão CC dos sistemas anteriores. Em Londres, a partir de 1890, as redes aéreas de distribuição de energia que haviam se expandido, seriam consideradas inaceitáveis e deveriam ser modificadas gradualmente para sistemas subterrâneos. Naquela época, os fabricantes britânicos de cabos que já haviam construído uma reputação na área de telegrafia desenvolveram técnicas para isolação de cabos de alta tensão e formas mais baratas de enterrar cabos nas ruas viabilizando a implantação dos sistemas subterrâneos (BEAMENT et. al., 1999).

No início do século XX, em 1908, a concessionária de distribuição de energia elétrica do Estado do Rio de Janeiro, LIGHT, já transformava uma parte de sua rede aérea em subterrânea. Os sistemas subterrâneos de distribuição de energia elétrica em malha reticulada vêm sendo utilizados desde o final do século XIX. Estes sistemas, no princípio, operavam em sistema de distribuição de energia em CC. A primeira rede subterrânea em malha reticulada em CA foi instalada na cidade de Memphis no Tennessee - EUA, instalado em 1907. Em 1925, na cidade de New York este tipo de sistema transformou-se num modelo consagrado para fornecer luz e força em seis malhas subterrâneas atendendo a uma carga total de 27,5 MVA, com 100 transformadores em operação (LANDMAN, 2007).

Durante a primeira metade do século 20 a maior parte dos sistemas de distribuição de energia elétrica era aérea. Todavia, com a multiplicação dos sistemas e quantidade de cabos telefônicos, telegráficos e de energia elétrica, formou-se um labirinto aéreo nas calçadas de

Nova Iorque no século XX, conforme a Figura 2.1 e fez com que as redes subterrâneas se tornassem esteticamente desejáveis.

Figura 2.1 – Calçadas de Nova Iorque (Século XX)

O atendimento de centros comerciais, shopping centers, loteamentos residenciais e a expansão industrial associados com a necessidade de mais confiabilidade tornaram os projetos de rede aérea menos econômicos. As novas técnicas de construção, os novos materiais, cabos e tipos de emendas mais econômicas e de fácil execução, trazidos com o desenvolvimento durante a Segunda Guerra Mundial ajudaram a mudar esta situação, tornando mais atrativas as redes subterrâneas. O desenvolvimento de transformadores subterrâneos para instalação sob as ruas, o transformador pedestal e as cabines metálicas instaladas ao nível do piso para equipamentos de seccionamento e proteção, trouxeram mais flexibilidade, confiabilidade e relativo baixo custo tornaram as construções mais atrativas e deram mais condições para expansão das redes subterrâneas.

Por fim, com o apoio da opinião pública, o entendimento sobre maior confiabilidade do fornecimento de energia, o impacto ambiental, a poda de árvores e morte de animais por choque elétrico, o risco de acidentes e o aumento do volume de obras ocasionaram maior pressão sobre a redução de preços e sobre a administração das empresas de distribuição de energia (PRYSMIAN, 2011).

Esses fatores proporcionaram a economia de escala para implantação destes sistemas. É fato que a padronização técnica e o aprimoramento dos estudos e técnicas de otimização das redes são o melhor caminho para redução dos custos e garantia de criação de oportunidades de expansão do sistema elétrico subterrâneo. Para fazer uma comparação com a Figura 2.1, a Figura 2.2 apresenta a cidade de Nova Iorque com as redes subterrâneas atualmente, sem a presença de nenhum fio, e com muitos prédios comerciais.

Figura 2.2 – Calçadas de Nova Iorque (2011)

No Brasil, os sistemas subterrâneos em malha reticulada foram implantados por volta dos anos 60. Tiveram pouca expansão devido aos altos custos do modelo quando comparados com as redes aéreas de distribuição. Os maiores custos das redes subterrâneas são os representados pelos cabos isolados, conexões da rede primária, protetores de redes e transformadores.

Com a implementação normativa da ANEEL, as empresas de energia estão restritas à aplicação de investimentos na rede quando analisados sob uma taxa de crescimento da região em estudo e horizonte de planejamento de sete anos, sob pena de comprometer a premissa básica de garantia da modicidade tarifária (PELEGRINI et. al., 2009).

As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam respectivamente a região de Visconde de Guarapuava (Paraná) com rede aérea e com rede subterrânea.

Figura 2.3 – Ruas de Visconde de Guarapuava (Paraná) com Rede Aérea de Energia

Figura 2.4 – Ruas de Visconde de Guarapuava (Paraná) com Rede Subterrânea de Energia

2.2 Características das Redes Subterrâneas

Na conversão de redes aéreas para subterrâneas, os eletrodutos e cabos elétricos podem ser enterrados em diversas configurações. Não há regulamentação do poder público quanto à forma de implantação e as próprias concessionárias seguem suas normas (KELMAN,

2011). A seguir a Figura 2.5 apresenta a configuração básica de um sistema sunterrâneo de energia.

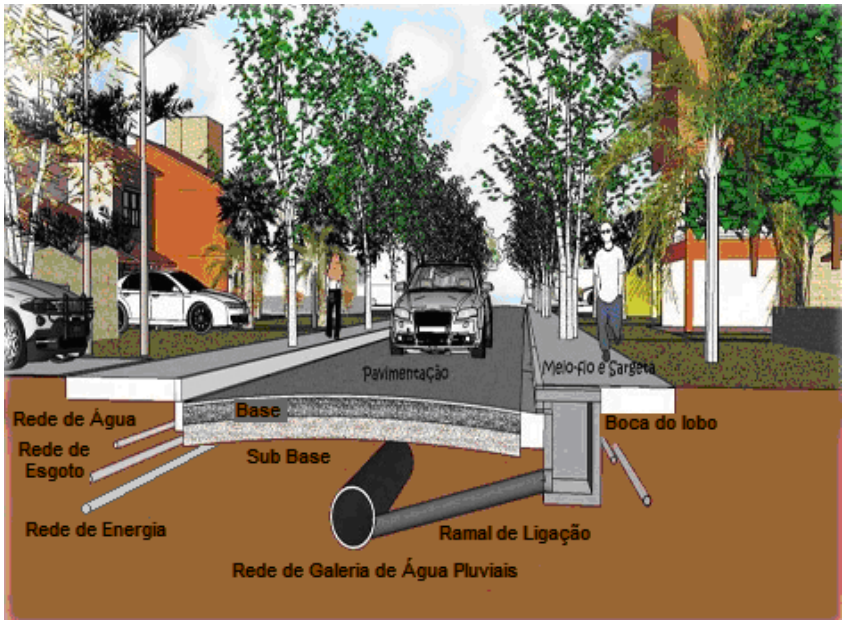


Figura 2.5 – Configuração Básica de Sistemas Subterrâneos

2.2.1 Rede Primária

A rede primária conduz a corrente elétrica em maiores tensões de distribuição. Geralmente, está enterrada no primeiro terço da via. Os cabos elétricos passam por dentro de eletrodutos de polietileno de alta densidade (PEAD), de 5" a 6" de diâmetro, enterrados diretamente no solo. Esses cabos são geralmente de alumínio, trifásicos, com isolamento EPR (Etileno-Propileno) ou XLPE (Polietileno Termofixo). A tensão depende muito do local da rede. Antes de adotar o atual procedimento de enterrar os eletrodutos diretamente no solo, as concessionárias os envelopava em concreto. A principal razão para praticamente abandonar o envelopamento foi a rapidez de implantação: estima-se que o ganho em velocidade é de duas a três vezes. Os eletrodutos da rede primária são enterrados a 80 cm da superfície, e procura-se manter 30 cm de distância da rede secundária e demais linhas de distribuição subterrânea.

2.2.2 Rede Secundária

Na rede secundária, as tensões são reduzidas pelos transformadores. Os eletrodutos, de cerca de 100 mm de diâmetro, ficam enterrados sob o passeio entre 40 e 60 cm de profundidade. Os cabos elétricos que percorrem os eletrodutos também são de alumínio e têm isolamento tipo XLPE.

2.2.3 Composição das Redes Subterrâneas

Redes de distribuição subterrânea são formadas por instalações e equipamentos com alta complexidade de implantação, operação e manutenção.

Os cabos são instalados em eletrodutos, agrupados em banco de dutos enterrados e, no sistema reticulado de baixa tensão, são interligados formando uma malha. Os cabos são dimensionados para quebrar (romper), por queima livre, para evitar a propagação de curtos-circuitos.

As redes subterrâneas são compostas por:

- As câmaras transformadoras (CTs): São construídas em concreto armado, situadas em via pública, providas de tampas para inspeção e acesso, em ferro fundido ou concreto, janelas para ventilação forçada e circuito interno exclusivo para iluminação. As CTs abrigam os equipamentos de transformação, chaves de seccionamento e protetores de rede. Existem bóias para impedir entrada de água pelos dutos de ventilação uma vez que os transformadores não operam debaixo d'água. Uma representação de como é os CTs é apresentado na Figura 2.6 a seguir.

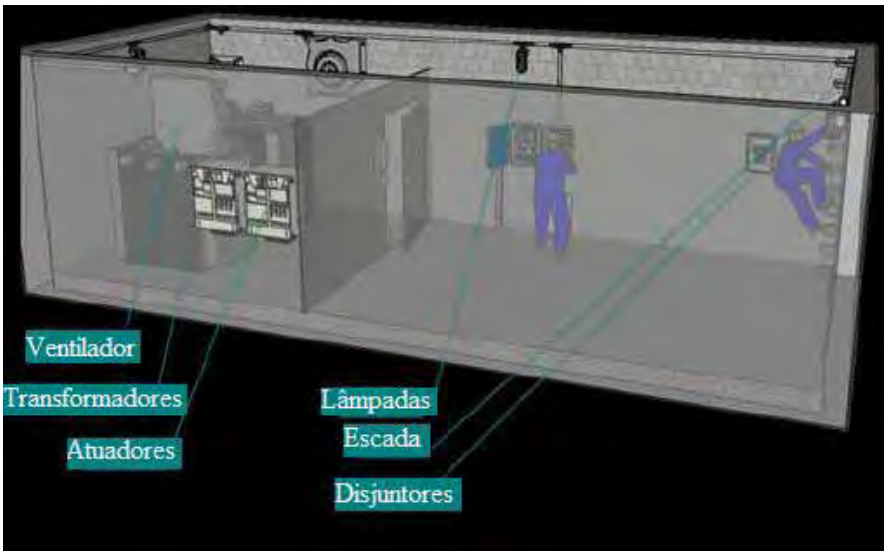


Figura 2.6 – Câmara Transformadora Subterrânea (Adaptado de LIGHT, 2011)

- As caixas de inspeção (CIs): São compartimentos subterrâneos para facilitar a passagem de cabos e a confecção de emendas, quando necessário. As CIs são menores que as CTs e auxiliam na inspeção e na manutenção das redes subterrâneas. As CIs não são hermeticamente fechadas para propiciar a saída de gases, o que, por outro lado, permite a entrada de água.

- As caixas de passagem (CPs): São as instalações subterrâneas para derivação dos ramais que atendem os clientes.

A seguir é apresentado na Figura 2.7 um esquema da composição da rede subterrânea.

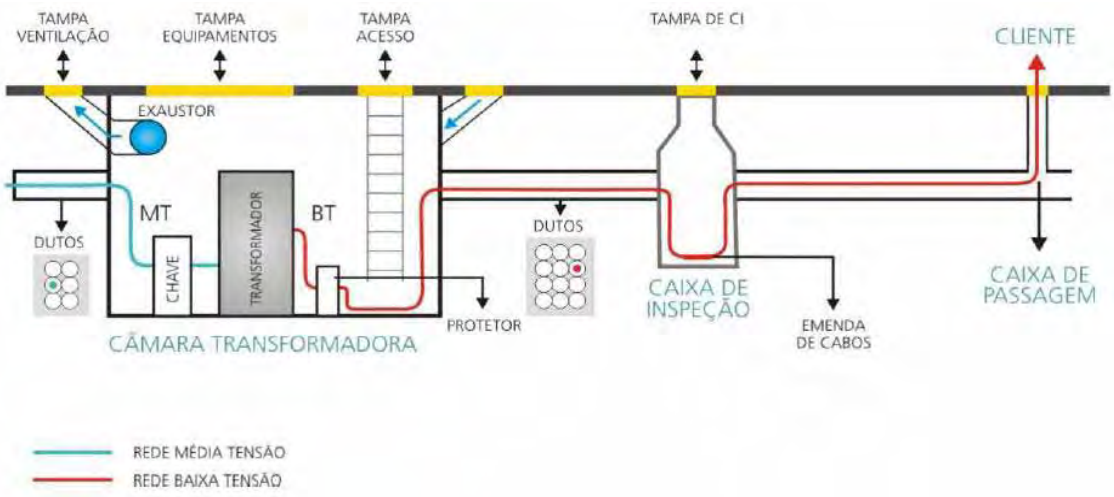


Figura 2.7 – Composição dos Sistemas Subterrâneos (Adaptado de LIGHT, 2011)

2.2.4 Tipologia dos Incidentes nas Redes Subterrâneas

A grande maioria dos incidentes percebidos na superfície são eventos que não apresentam risco para a população, embora possam parecer assustadores, na medida que por vezes soltam fumaça devido a queima do cabo, ou do óleo do transformador. Mas, o fato é que os cabos de sistemas reticulados (BT) são projetados para romperem, às vezes soltando fumaça, numa situação de curto-circuito. Nesse sentido é conveniente classificar os sintomas de problemas no sistema subterrâneo de forma a avaliar as causas e os riscos associados.

Fumaças em câmaras e dutos subterrâneos: os cabos do sistema reticulado (BT) são projetados para queima livre, podendo produzir fumaça. Também há emissão de fumaça quando o calor gerado por um curto circuito numa CI vaporiza a água que penetrou pela tampa, dutos ou pelo solo, em geral devido a vazamentos das tubulações de saneamento.

Fogo em câmaras subterrâneas: pequenos incêndios (arco elétrico) podem ocorrer na malha de distribuição subterrânea quando um equipamento entra em sobrecarga ou quando ocorre um curto-circuito.

Em alguns incidentes ocorre o deslocamento da tampa e bueiros das CTs e CIs, sendo que, se podem dividir em 2 categorias esses tipos de deslocamento.

Deslocamento sem presença de combustível: quando ocorrem curtos nas CIs ou CTs, há um aquecimento do ar ou da água, que vira vapor, o que provoca uma diferença na pressão em relação à pressão atmosférica, ocasionando dessa forma um deslocamento da tampa, geralmente discreto, podendo causar danos às pessoas próximas do local do incidente.

Deslocamento com presença de combustível: um curto-circuito em situações normais não causaria grandes problemas, mas na presença de combustível em grande quantidade pode gerar explosões, deslocando abrupta e fortemente a tampa da câmara. Esse combustível pode provir da contaminação por substâncias inflamáveis como o gás canalizado, os gases provenientes da rede de esgotos ou da decomposição de resíduos, e também do vazamento de combustível de postos de gasolina, ou ainda o óleo isolante dos transformadores, pois esse material também é inflamável (AQUINO, 2011).

2.2.5 Compartilhamento do Subsolo

As redes subterrâneas de distribuição de energia compartilham o uso do subsolo com outras concessionárias de serviço público, como gás canalizado, telecomunicações, água,

esgotos, além de galerias pluviais, rede de metrô e demais estruturas alojadas no subsolo das cidades. A Figura 2.8 ilustra alguns problemas que ocorrem nos sistemas subterrâneos.

O compartilhamento do subsolo, apesar da separação das redes, propicia que gases escoem pelo subsolo e adentrem nas instalações subterrâneas, a despeito dos esforços para isolamento e impermeabilização das estruturas por parte das concessionárias.

As redes sofrem ainda com a depredação e o furto de cabos e outros equipamentos com metais de baixo valor para os infratores, mas fundamentais para o sistema de distribuição. No sistema reticulado, o fornecimento de energia não é interrompido automaticamente, como aconteceria com um sistema radial, pois a carga pode ser remanejada, preservando o fornecimento. Essa vantagem acaba sobrecarregando os demais elementos da rede, que só irão apresentar problemas a médio e longo prazo. Dada a complexidade do sistema e a dificuldade de acesso visual, a identificação dos elementos de rede danificados ou furtados requer, além de constante monitoramento, a investigação em laboratório, incluindo a utilização de unidades móveis, para localização de defeitos.

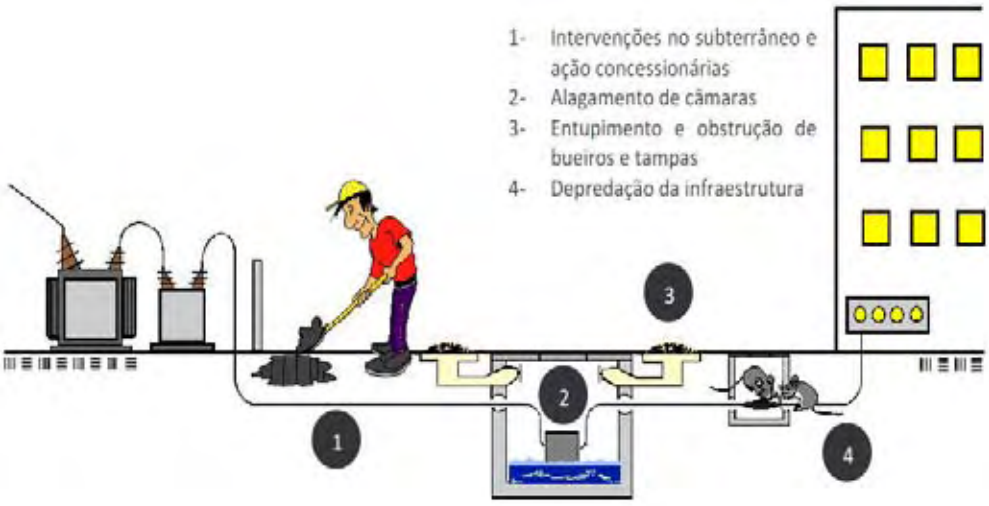


Figura 2.8 – Problemas Encontrados nos Sistemas Subterrâneos (Adaptado de LIGHT, 2011)

2.2.6 Métodos de Escavação e Passagem dos Fios

Os eletrodutos podem ser enterrados por meio de escavação de valas ou por métodos não destrutivos (MNDs). Com o uso dos MNDs, reduz-se as intervenções nas vias e danos aos solos, por exemplo. Um estudo de viabilidade determina se o procedimento é possível.

2.2.7 Tipos de Sistema Subterrâneo

Há vários tipos de sistema de distribuição elétrica subterrânea. O sistema secundário reticulado utiliza quatro alimentadores de média tensão - é um sistema antigo e, apesar de bastante confiável, tem custo de implantação elevado e forma de operação complexa. O sistema primário seletivo opera de forma parecida com o reticulado secundário, mas atualmente as concessionárias têm adotado o padrão com apenas dois alimentadores - é um sistema muito usado em grandes empreendimentos como hospitais e shoppings. Em redes subterrâneas públicas em São Paulo, tem se utilizado geralmente o sistema radial com recursos - conhecido também como "anel aberto". Ele oferece boa confiabilidade e tem custo de implantação menor e operação mais simples do que os dois primeiros.

As Figuras 2.9, 2.10 e 2.11 apresentam algumas configurações de rede utilizadas nos sistemas subterrâneos.

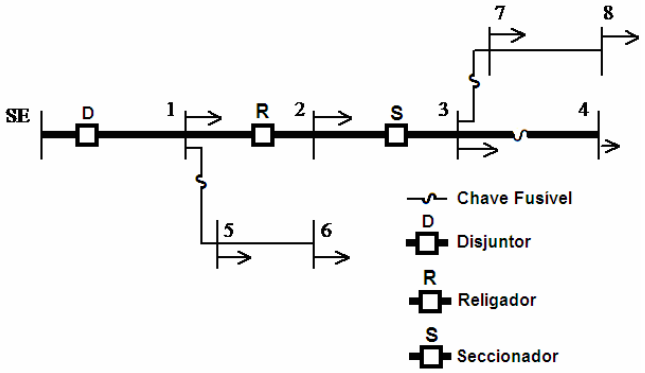


Figura 2.9 – Sistema Radial Simples

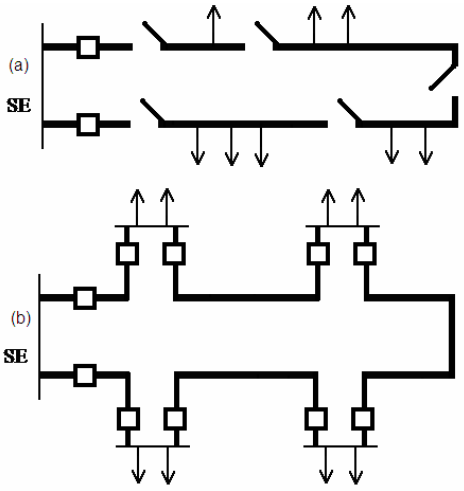


Figura 2.10 – Sistema em Anel Aberto (a) e Fechado (b)

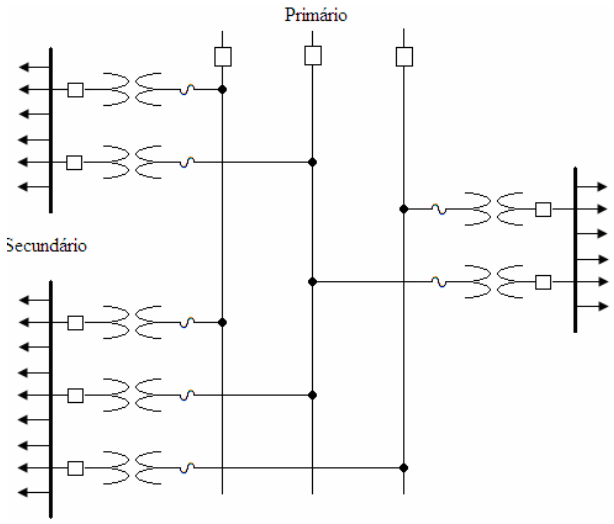


Figura 2.11 – Sistema Reticulado Dedicado ou Exclusivo

2.3 Viabilidade Econômica de Instalação de Redes Subterrâneas

As redes de distribuição aéreas (RDA) apresentam um custo inferior para sua instalação, por outro lado os custos de manutenção e operação são elevados. Sem levar em conta com os problemas de vandalismo, furto de cabos, as perdas relacionadas ao efeito corona, os campos magnéticos, o uso de compensadores, além de que ocupam espaço e empobrecem as paisagens das cidades brasileiras.

Na RDA, uma vez que os cabos ficam expostos, problemas ocorrem com maior frequência e as intervenções para consertos precisam ser freqüentes. Os danos são causados por raios (descargas atmosféricas), ventos, pássaros, chuvas, contaminação ambiental (poluição, salinidade) e acidentes com veículos que atingem postes. Além de que, é grande o número de pessoas que morrem todo ano devido aos acidentes com os fios, que em sua maioria são construídos com cabos não-isolados (NOGUEIRA, 2010).

Uma solução para os grandes centros urbanos é a utilização das redes de distribuição subterrâneas (RDS), pois proporciona maior confiabilidade, segurança, integração com o meio ambiente, valorização da área e possui menor interferência com arborização. Todavia, sua desvantagem é em relação a derivações complexas e alto investimento inicial, com utilização de itens, como cabos de energia de media tensão com isolação elétrica adequada, podendo chegar a dez vezes mais que a rede convencional (PIRELLI, 2000).

A isolação elétrica é uma das mais importantes partes dos componentes de alta tensão e sua qualidade determinam a confiabilidade dos diversos equipamentos elétricos utilizados na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, tais como cabos, isoladores, transformadores, geradores e motores (NOGUEIRA, 2010).

Os cabos isolados de média tensão empregados em RDS mantêm um campo elétrico confinado e baixa influência do campo magnético no meio. Em campo, eles podem ser instalados em dutos ou diretamente enterrados no solo. Para qualquer uma dessas situações, o ambiente no qual o cabo esta imerso experimentará vários estresses. Ainda, estão associados à alta confiabilidade, com índices reduzidos de interrupção devido as suas características construtivas que impedem a ocorrência de perturbações devido aos fenômenos climáticos, mecânicos ou humanos. No entanto, quando ocorrem as falhas em cabos subterrâneos, a manutenção é mais custosa, pois exigem a substituição da seção de linha defeituosa para o restabelecimento do sistema, além de possuir uma análise mais complexa.

De forma distinta as redes aéreas, onde a localização de defeitos pode ser realizada por meio de inspeções visuais, a topologia subterrânea impossibilita a utilização desta abordagem (NOGUEIRA, 2010), pois seus cabos estão enterrados, dentro ou fora de tubulações sob a terra.

Ao levantar alguns custos de implantação das redes convencionais, compacta e subterrânea, assim como os valores gastos com manutenção, custos de perdas, de interrupções e de poda de árvores, verificou-se em 2004 que a relação aproximada entre os custos de implantação da rede convencional (primária e secundária), da rede compacta (primária e secundária), e da rede subterrânea era 1x1x3 (um pra um, pra três). A rede compacta já é

totalmente viável, principalmente por ter custo de implantação praticamente igual à rede convencional e ter custo de manutenção menor. A rede subterrânea, embora com custo de implantação aproximadamente três vezes maior quando comparado com o custo da convencional, por ter reduzido custo de manutenção e pela alta confiabilidade do sistema elétrico, seu uso já pode ser viável em diversas ocasiões (ROBBA, 2004).

2.3.1 Aplicações da Distribuição de Energia Elétrica no Brasil

O consumo de energia elétrica vem crescendo rapidamente nos grandes centros urbanos, necessitando cada vez mais de novas instalações, isso acarreta muitas vezes um crescimento desordenado na RDA.

Esse crescimento desordenado causa uma disputa de espaço entre árvores e as redes elétricas, isso sem dúvida é um dos principais problemas existentes na arborização de uma cidade. Além disso, a maioria das árvores, uma vez podadas, começa a brotar em direção aos condutores elétricos, precisando de novas manutenções em curto espaço de tempo, pois um simples contato do condutor com um galho de uma árvore pode causar uma interrupção no fornecimento de energia em partes da rede de distribuição.

Outro problema que pode ser visto nas RDA é que ela fica totalmente desprotegida contra influências do meio ambiente (raios, ventos, chuvas, poluição ambiental), e situações adversas (danificação de postes, furto de cabos), apresentando uma alta taxa de falhas e desligamentos da rede.

Cortes de eletricidade não planejados podem causar uma situação insustentável. Muitas das interrupções duram horas até serem restabelecidas. Além do mais, é muito alto o prejuízo que tais falhas de energia acarretam devido à perda de muitos dias de trabalho (CORREA et.al., 2009).

Deste modo, as RDS estão sendo cada vez mais utilizadas porque trazem grandes benefícios de segurança, confiabilidade e em alguns locais, até mesmo benefícios econômicos.

Quando se somam os custos de poda de árvore, da interrupção do fornecimento de energia, os custos sociais, da falta de segurança e da não produção, fica mais fácil notar que ao longo do tempo as redes subterrâneas são vantajosas, tanto para quem instala quanto para quem as utiliza (CORREA et.al., 2009). Um exemplo disso são condomínios que optaram por instalações subterrâneas, explicitando uma valorização do patrimônio que supera o investimento feito. Outra demonstração dessa vantagem é a instalação de RDS em usinas

eólicas, devido à confiabilidade, redução do custo de manutenção e diminuição da contaminação ambiental, evitando possíveis perdas monetárias no momento de interrupção de fornecimento de energia (NOGUEIRA, 2010).

2.3.2 Aspectos Técnicos

As próprias características dos padrões e dos equipamentos das instalações das redes aéreas e subterrâneas são determinantes na complexidade técnica desses sistemas resultando em diferentes níveis de desempenho operativo, de manutenção, bem como de construção e de expansão.

As redes aéreas são simplesmente sustentadas por estruturas ao tempo, sujeitas à níveis de agressividade de natureza diferentes do que estão sujeitas as redes subterrâneas, que devem ser protegidas em ambientes fechados, enterradas e em muitos casos devem suportar a imersão em água ou em outros líquidos mais agressivos.

As correspondentes taxas de defeito de redes primárias, de transformadores de distribuição e de redes secundárias são superiores às referentes a redes subterrâneas. A duração da interrupção média do fornecimento de energia, a cada consumidor (DEC), é função da freqüência média de interrupção (FEC) e do tempo de restabelecimento (TMA).

Quando se trata de redes subterrâneas observam-se diferentes graus de continuidade e de dificuldade de manutenção preventiva e corretiva, conforme seja a topologia da rede subterrânea: reticulado, radial, híbrida, submersível ou pedestal. Porém a continuidade em todos os casos é no mínimo boa, pois o sistema é protegido, sujeito à baixa interferência de agentes externos, não obstante as intervenções de outros serviços públicos não raramente provocam interrupções pelas agressões resultantes de escavações descuidadas.

A rede subterrânea tipo reticulado apresenta alto grau de confiabilidade, graças à topologia em malha da rede secundária e aos protetores de rede instalados nos barramentos secundários de cada um dos transformadores. Mesmo nas redes radiais, os transformadores querem sejam submersíveis ou em pedestal, são supridos por dois alimentadores, salvo raras exceções. Portanto apresentam bons índices de continuidade com respeito ao desempenho da rede primária, cujo defeito atinge muitos consumidores. O possível e freqüente automatismo na transferência de transformadores de um alimentador com defeito para outro, melhora ainda mais a continuidade. Os defeitos na rede secundária também são mais raros nas redes subterrâneas do que nas aéreas.

2.3.3 Aspectos Urbanísticos e Regulatórios

Há consenso que a diferença do impacto urbanístico de uma rede de distribuição subterrânea é muito menor do que uma rede aérea em termos de poluição visual, deslocamento de pedestres, trânsito de deficientes físicos e visuais além do risco de acidentes com arborização, entre outros. No passado em várias cidades brasileiras um critério importante para implantar uma rede subterrânea era definido por um zoneamento, orientado pelo planejamento urbano e pela importância da carga, porém fundamentalmente estabelecido pela própria concessionária onde havia regiões com redes aéreas ou subterrâneas operando ou previstas e outras áreas "futuras subterrâneas". Esse critério está praticamente em desuso por não atender plenamente os interesses dos clientes envolvidos, que por razões econômicas ou de estética ora se satisfazem com o tipo de rede prevista ora não, e também pela relutância da concessionária em implantar redes subterrâneas de alto custo (MAGALHÃES et. al., 2006).

O fator referente à estética urbanística tem sido o grande motivador das solicitações de aterramento de redes e expansão do sistema subterrâneo, pelos vários benefícios que apresenta para a municipalidade e para os clientes, de modo geral, mas o atendimento dessas solicitações tem encontrado barreiras nas concessionárias que alegam que o benefício direto da rede subterrânea não lhe traz compensação econômica. Não obstante, a rede subterrânea apresenta uma melhora da imagem da concessionária, porque a concessionária estará preservando a comunidade de vários tipos acidentes que freqüentemente ocorrem com redes aéreas e dispensa as "mutilações" da arborização, tão protegida nas grandes metrópoles.

2.3.4 Aspectos Econômicos

O fator econômico tem sido o maior inibidor da instalação de redes subterrâneas no Brasil.

Um fato relevante do ponto de vista econômico é que as primeiras redes subterrâneas instaladas em São Paulo foram do tipo reticulado, cujo custo é muito elevado pela alta confiabilidade que apresentam, e se prestaram como referência de custo durante muito tempo, criando uma espécie de "preconceito econômico" contra redes subterrâneas, qualquer fosse o seu tipo.

Efetivamente, o custo das redes subterrâneas, embora superiores vêm se aproximando do custo das redes aéreas.

Nos últimos anos, as redes subterrâneas têm apresentado importantes avanços para diminuição de custos, como a utilização de transformadores em pedestal, redes em covas rasas, eliminação do uso de protetores de rede através da aplicação de chaves de transferência em sistemas primários seletivos, a redução do custo dos protetores de rede com a utilização de tecnologia nacional, cabos secos, cabos de alumínio, etc. As redes aéreas, por outro lado, vêm se sofisticando, melhorando o desempenho do sistema através da utilização de novas tecnologias, o que aumenta os seus custos. Dentre essas novas tecnologias estão os religadores e os seccionadores automáticos, cabos cobertos, alimentadores compactos e para-raios de dióxido de carbono.

A análise econômica da aplicação de redes aéreas e subterrâneas deve incluir a questão da repartição do ônus das obras entre concessionária e demais agentes envolvidos, usualmente a municipalidade e clientes, e os mecanismos de retorno e de remuneração do investimento realizado pela concessionária de distribuição de energia.

Os clientes e a municipalidade, quando requerentes de uma conversão de rede aérea em subterrânea, em geral participam, de forma arbitraria, dos custos de instalação, o que viabiliza a ação de implantação da rede subterrânea.

Quanto à remuneração e retorno do investimento da concessionária, é importante considerar que todos os investimentos necessários, obrigatórios e prudentes na rede, são incluídos nos ativos da empresa e remunerados de acordo com resolução da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, mediante a inclusão na estrutura tarifária, que é revista periodicamente. Assim, a questão do custo da instalação da rede se reduz à capacidade de investimento da empresa e à remuneração do desbalanço do fluxo de caixa entre o período de desembolso entre a instalação da rede e a revisão tarifária. Isto ameniza de certa forma, o impacto do custo da rede. (ANEEL, 2008)

Finalmente, a fraude e o furto de cabos devem ser, infelizmente, considerados como um dos componentes de custo da rede, em face de grande importância desses fatores atualmente. O risco de fraude é maior nas redes aéreas em relação às redes subterrâneas pela facilidade do acesso tanto à rede como ao ramal de ligação/medidor.

2.3.5 Distribuição das Redes no Brasil e no Mundo

No Brasil, a aplicação das redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica não atinge 2% do total das redes de baixa tensão ($V \leq 1kV$) e de média tensão ($1\ kV < V \leq 25\ kV$), conforme apresentado nas Tabelas 2.2 e 2.3:

Tabela 2.2 – Composição das Redes Urbanas no Brasil

Tipo	MT (km)	%	BT (km)	%	MT+BT (km)	%
Aérea	293.625,860	98,148	488.724,430	98,626	782.350,290	98,446
Subterrânea	5.541,350	1,1852	6.806,980	1,374	12.348,330	1,554
Total	299.167,210	100,00	495.531,410	100,00	794.698,620	100,00

Fonte: Dados dos relatórios de revisão tarifária das concessionárias do site da ANEEL-2010.

Tabela 2.3 – Composição das Redes Rurais no Brasil

Tipo	MT (km)	%	BT (km)	%	MT+BT (km)	%
Aérea	1.361.466,740	99,997	306.949,550	99,981	1.668.416,290	99,994
Subterrânea	42,820	0,003	59,530	0,019	102,350	0,006
Total	1.361.509,560	100,00	307.009,080	100,00	1.668.518,640	100,00

Fonte: Dados dos relatórios de revisão tarifária das concessionárias do site da ANEEL-2010.

Os dados das Tabelas foram montados a partir de informações apresentadas nas notas técnicas das revisões tarifárias de 2007 a 2009 das 60 maiores empresas de um total de 70 concessionárias e 32 permissionárias cadastradas na ANEEL.

No âmbito mundial observa-se um cenário diferente em relação à utilização das redes subterrâneas, conforme visto na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Composição das Redes em Outros Lugares do Mundo

Local	Aérea (km)	Subterrânea (km)	Total (km)	% de Redes Subterrâneas
Europa	4.768.336	3.178.890	7.947.226	39,999
América do Norte	29.249.440	5.990.849	35.240.289	16,999
Leste da Ásia	4.456.785	137.838	4.594.623	2,999
Total	38.474.561	9.307.577	47.782.138	19,479

Fonte: International Copper Association - 29.04.94

2.3.6 Análise de Custos

Para uma comparação entre os circuitos de distribuição é necessário analisar os custos de cada circuito, desde os custos dos equipamentos para a sua instalação e os custos de sua manutenção, e o gasto que suas perdas acarretam.

No estudo feito em (ROBBA, 2004), estabeleceu-se a seguinte área para realizar devidas comparações:

- Área de 1 km^2, constituída de 100 quadras de 88 m x 88 m;
- Largura das vias pública: 12 m (calcadas: 2m, leito carroçável: 8 m);
- Carga uniformemente distribuída;
- Entradas de consumidores: 10 por calcada / quadra;
- Consumidores trifásicos alimentados em baixa tensão;
- Densidades de carga 5, 10, 20 MVA/km^2; e
- Máxima queda de tensão nos circuitos secundários: 3 %.

Robba apresentou comparações de custo de implantação entre rede aérea nu, rede aérea compacta e rede subterrânea, para 5MVA, 10 MVA e 20MVA. O custo das redes subterrâneas é maior que três vezes as redes aéreas.

Em seu estudo, Robba também avaliou os gastos com perdas técnicas e com podas de árvore, o que diminui bastante a relação entre as redes aéreas e subterrâneas. Outras variáveis que também foram avaliadas e que também diminuem a relação entre as configurações das redes é a manutenção corretiva e o custo de multas pagas por causa da energia interrompida.

Assim, Robba conclui que após 10 anos os custos da rede subterrânea é um pouco maior que o dobro da rede aérea convencional e da rede aérea compacta. Entretanto se observar a rede aérea total (convencional e compacta), os custos estão quase equiparados com os custos da rede subterrânea.

Desse modo, pode-se ver que na primeira análise comparando a rede subterrânea com a rede convencional ou com a rede compacta, a concessionária começará a ter um retorno apenas após 20 anos. Na segunda análise, pode-ser ver que somente após 10 anos é que se começa a ter um retorno financeiro, isso é um tempo pequeno para a durabilidade do sistema.

2.4 Métodos de Localização de Faltas

Determinar a localização do ponto de falta em um cabo subterrâneo, o mais rápido possível, é de suma importância para garantir a operação confiável e econômica do sistema. Sabendo-se a localização da falta, além de garantir a segurança do sistema, reduz-se tempo na inspeção, manutenção e reparação do cabo, o que permite uma rápida restauração da operação nas condições normais desejadas. Sendo assim, além de prover a localização da falta, também se podem determinar faltas transitórias, alertando possíveis pontos fracos no sistema de distribuição, possibilitando executar medidas preventivas para evitar danos maiores no futuro.

O desempenho dos cabos subterrâneos depende do número de parâmetros que não possa se manter constantes durante um longo período de tempo, e das consequências que estes podem causar no funcionamento normal do sistema. Qualquer variação na constante dielétrica leva a uma variação na capacitância de sequência positiva, negativa e zero trifásica do cabo. Isto levará a uma variação nas admitâncias seqüenciais de fase, na propagação da velocidade e a um erro na localização da falta. Um dos principais parâmetros que afeta as propriedades elétricas é a umidade (ELMQVIST, 1978). Outro parâmetro que afeta as propriedades do material isolante do cabo é a temperatura, que varia a constante dielétrica do cabo com o passar dos anos. O aquecimento se deve ao excessivo sobrecarregamento ou devido à corrente de falta alta que causa a degradação da isolação do cabo (NAIDU, 1985).

Os localizadores de faltas processam os dados registrados digitalmente de modo *off-line* e assim, não estão sujeitos às restrições de processamento impostas aos relés de proteção, que devem operar em modo *on-line*. Isso permite um aumento na sofisticação dos algoritmos e, portanto, na precisão relacionada à localização de faltas (GAUTIER, 1996).

Os métodos de localização da falta no segmento para rede de cabo subterrâneos podem ser divididos em dois grupos principais: Métodos Traçadores e Terminais. O método traçador é uma forma exaustiva de localizar a falta no segmento "percorrendo" os circuitos de cabos. A falta pode ser determinada por áudio ou sinais eletromagnéticos e exige o envio de trabalhadores para a área de interrupção (JAE-DUCK et. al., 2006).

Várias técnicas têm sido largamente utilizadas nas indústrias, incluindo o rastreio através da abordagem acústica, eletromagnética ou corrente (BASCOM et. al., 1994). Em contraste, o método terminal é um método usado para determinar a localização da falta de uma rede de distribuição de cabos a partir de uma ou ambas as extremidades sem o rastreamento exaustivo.

A técnica da ponte é uma das mais populares entre os métodos terminais que consiste em conectar um resistor para determinar a localização da falta (BUNGAY et. al., 1990).

Outros métodos terminais, incluindo laço *Murry* e radar de pulsação, têm sido também utilizados (TANAKA et. al., 1983). A abordagem de onda viajante é outra forma para detectar a falta injetando sinais de pulso no cabo defeituoso. Isto produz uma forma de onda refletida que detecta a falha (POTIVEJKUL et. al., 2000). Este método baseia-se na determinação do intervalo de tempo de viagem, da onda de tensão ou corrente, do ponto da falta ao terminal da linha onde está instalado o localizador e da velocidade de propagação desta onda na linha, para estimar a distância da falta. Similarmente, ondas geradas por faltas têm sido usadas para executar tanto em tempo real como após a localização da falta para um sistema de distribuição

de cabos residenciais em configuração de fase simples (WIGGINS et. al., 1994). Uma abordagem para combinar lógica *fuzzy* com análise de processamento de sinais de pequenas ondas pode ser usada para um sistema de cabos subterrâneos de núcleo simples (MOSHTAGH et. al., 2004). Uma investigação preliminar de sistema de cabos pode ser conduzida em uma configuração de seção-simples, contudo, a blindagem do sistema de distribuição de cabos usando o método dos múltiplos pontos aterrados demonstrado em (BECKER et. al., 2001) não foi incorporado na proposta de (XIA YANG, 2008). A comparação da técnica de acoplamento em radio-frequência (KERSTING, 2006) como uma abordagem de medição prática pode ser realizada, a fim de validar os resultados da predição numérica do algoritmo proposto em (XIA YANG, 2008).

Os métodos de pré-localização e de localização de faltas podem ser classificados em duas diferentes categorias: métodos baseados na frequência fundamental e métodos baseados nos transitórios de altas frequências (MYEON-SONG et. al., 2004) gerados por uma situação de falta (métodos de ondas viajantes).

Esses métodos de localização, de acordo com o modo de obtenção dos dados, podem ser classificados em: técnicas que dispõe de dados provenientes de um único terminal ou de dados provenientes de múltiplos terminais da linha de distribuição.

Os algoritmos de localização de faltas que utilizam dados provenientes de um terminal da linha, os quais consideram as componentes de frequência fundamental, são em sua maioria, baseados na determinação da impedância aparente da linha de transmissão vista do local de medida durante a falta. Esta impedância é obtida em função dos parâmetros da linha de transmissão e dos fasores de frequência fundamental de tensão e corrente, originados em um dos terminais da linha de transmissão (GILANY et. al., 2007). Melhorias em tais métodos são alcançadas utilizando-se de medições sincronizadas nos terminais. Sobre esse assunto, deve-se mencionar que se faz necessário um meio de comunicação entre os terminais para transmissão dos dados de falta registrados para um terminal de referência, onde será realizado o processamento para a localização da falta. Contudo, ao contrário da detecção da falta, que opera em modo *on-line* e, por essa razão, exige alta velocidade e canais de comunicação contínuos, os requisitos de comunicação para os localizadores são bastante simples, uma vez que o algoritmo opera em modo *off-line* (SILVA, 2003).

Os métodos que utilizam as componentes de alta frequência dos sinais transitórios gerados por uma falta estão fundamentados na teoria de ondas viajantes. Estes algoritmos são baseados na determinação do tempo de viagem da onda de tensão ou corrente do ponto de

falta ao terminal de monitoramento e na velocidade de propagação da onda viajante na linha, a qual é função dos parâmetros da mesma (DAUD, 2009).

A implementação dos algoritmos que consideram o emprego da teoria das ondas viajantes necessita da utilização de elevadas taxas de frequência de amostragem, o que vem a ser uma das principais limitações. Todavia, o progresso atual da tecnologia dos conversores A/D de alta velocidade e dos processadores de sinais digitais de alto desempenho, têm tornado possível essas operações. Além disso, técnicas como processamento paralelo tendem a viabilizar altas velocidades de execução de tais tarefas (SILVEIRA, 2001).

Mais recentemente, tem sido proposto o emprego de ferramentas inteligentes como Redes Neurais Artificiais (RNAs), assim como, aplicação de ferramentas matemáticas, como por exemplo, o uso da Transformada *Wavelet* (TW) ao problema de localização de faltas. Encontram-se também na literatura, trabalhos associando-se ambas as ferramentas, RNAs e TW, aplicadas a solução do mesmo problema (SILVA, 2003).

A localização da falta em um segmento de um sistema de cabos subterrâneos exige aspectos mais amplos de reflexão e análise (CLEGG, 1993). Ao contrário das linhas aéreas, os cabos subterrâneos têm como características: indutâncias menores e capacitâncias maiores. A análise torna-se complicada quando vários tipos de cabos subterrâneos são usados. Um exemplo poderia ser um sistema de cabos que consiste em vários condutores tais como núcleo, blindagem e armadura. Para analisar tal sistema de cabos, impedâncias e admitâncias mútuas entre estes condutores devem ser consideradas no circuito analisado. Isto complica o aspecto analítico de identificação da falta no segmento.

2.4.1 O Conceito de Falha

A ocorrência de distúrbios elétricos está relacionada a diversos fatores que podem ter origens diversas. Estas perturbações podem resultar no desligamento do sistema elétrico ou produzir valores inaceitáveis de tensão, corrente ou frequência.

A definição de distúrbios elétricos compreende as situações onde há uma variável indesejada aplicada ao sistema, a qual tende a afetar o funcionamento correto do sistema. Segundo (GRAINER, STEVENSON JR, 1994), define-se falta em sistemas elétricos, qualquer falta que interfira no fluxo normal de corrente. As perturbações severas são responsáveis por causar blecautes e falhas em cascatas e influenciam diretamente os indicadores de qualidade de energia.

2.4.2 Tipos de Falhas em Cabos Subterrâneos

Sistemas de energia devem garantir uma boa qualidade na entrega de energia aos pontos consumidores, porém está sujeito a diversos eventos indesejáveis que causam faltas, como por exemplo, rompimento de condutores, descargas atmosféricas, rompimento dielétrico, etc. As faltas que ocorrem nos sistemas elétricos estão dentro de duas naturezas, as quais são: temporária ou permanente.

As faltas temporárias são causadas normalmente por descargas atmosféricas e corrigidas pelo religamento automático do sistema, porém sua correta localização é importante para a criação de um histórico confiável sobre as descargas atmosféricas ocorridas na região e estudos de desempenho e localização dos equipamentos de proteção dos sistemas de energia.

As faltas permanentes são causadas por rompimento de condutores, defeitos em isoladores instalados em regiões poluídas ou com queimadas, devido ao rompimento dielétrico. Um funcionário, habilitado a fazer a manutenção, faz a correção rapidamente ao chegar ao local exato, diminuindo assim o tempo total de reparo e de interrupção no fornecimento de energia (GULDBRAND et.al., 2007).

Desta forma, percebe-se a grande importância da correta identificação do local de ocorrência e da distância de ocorrência de uma falta, seja ela permanente ou temporária.

Em operação, os cabos subterrâneos estão sujeitos a diversos fatores de estresse cuja atuação combinada pode levar à degradação da isolação do cabo, tais como: campo elétrico aplicado, gradientes de temperatura, variações de temperatura no ambiente e umidade (NOGUEIRA, 2010).

Apesar da separação de redes, o compartilhamento do subsolo propicia que gases escoem pelo subsolo e adentrem nas instalações subterrâneas causando danos aos cabos. Em cidades antigas, tal como o Rio de Janeiro, há ainda problemas ocasionados pelas instalações serem muito antigas, por vezes centenárias. (LIGHT, 2011).

Uma vez que os sistemas elétricos subterrâneos não estão sujeitos à descargas atmosféricas diretas, rompimentos ou existência de sal na cadeia de isoladores, ventos, queda de árvores sobre linhas de transmissão, colisão de veículos com torres ou postes, contato de pássaros, colisão de aeronaves, entre outros estresses mecânicos típicos de redes aéreas, suas falhas são tipicamente permanentes e ocasionadas pela deterioração do isolante do cabo subterrâneo e, principalmente, pela degradação do elemento dielétrico devido ao fenômeno *water-treeing* (FILOMENA, 2008).

Segundo (FILOMENA, 2008), o fenômeno *water-treeing*, ou arborização, pode ser ocasionado pela água ou ter origem do campo elétrico e umidade que em conjunto são responsáveis por ocasionar uma ruptura dielétrica parcial do sistema dielétrico. Este fenômeno é desenvolvido ao longo da vida útil do condutor, acelerando o processo de degradação do elemento dielétrico. A existência de um número excessivo de fissuras reduz a capacidade dielétrica do cabo, provocando a ocorrência da falta. A Figura 2.12 apresenta duas imagens deste fenômeno.

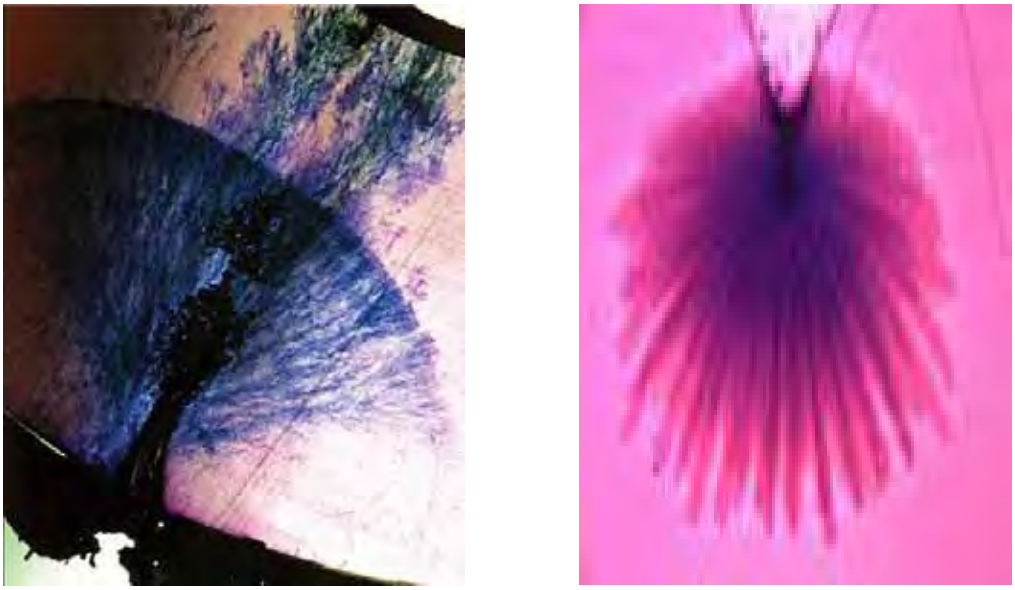


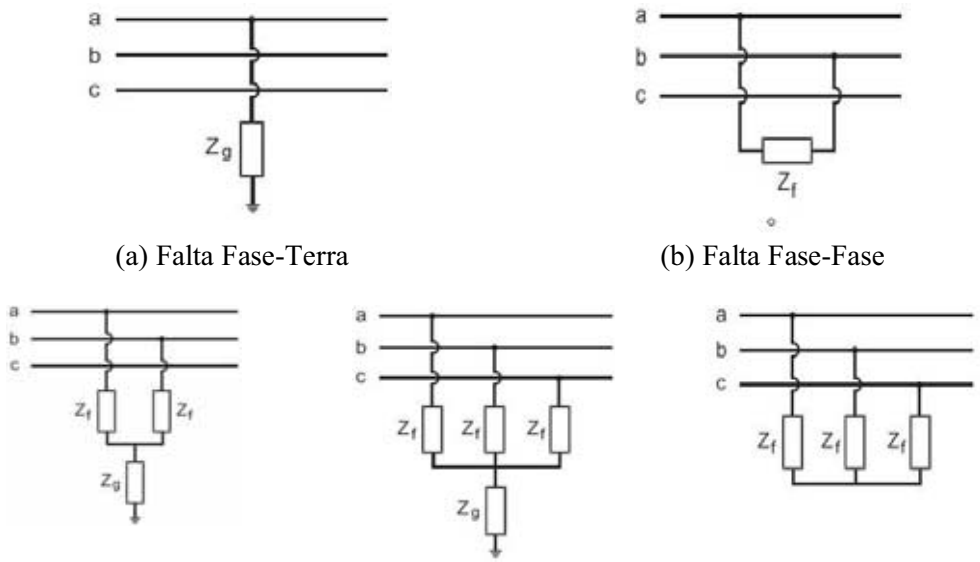
Figura 2.12 – Formas Típicas do Fenômeno *Water-Treeing* (GULSKI, et. al., 2008)

Há muitos tipos de falhas em cabos subterrâneos, e mesmo falhas semelhantes podem exibir diversos sintomas diferentes em ambientes, sistemas de cabos, ou aplicações distintas. Para que seja possível diagnosticar o defeito sem demora e selecionar o procedimento operacional apropriado, o sistema de distribuição subterrânea pode ser dividido em duas categorias: distribuição radial direta e distribuição reticulada. Os procedimentos para localização de defeitos podem ser adaptados para um problema particular e são facilmente controlados. Em distribuição reticulada, os procedimentos para localização de falhas dependem principalmente de muitos parâmetros inter-relacionados que tornam a solução de um problema particular mais complexa (IEEE Std, 2007).

2.4.3 Modelos de Faltas

A representação de faltas do tipo *shunt*, ou derivação, é realizada através de cinco modelos com base em elementos de circuitos elétricos. Faltas simétricas correspondem às faltas trifásicas, que são caracterizadas pela contribuição balanceada de cada fase à perturbação. Os demais tipos de faltas são denominados de defeitos assimétricos e são caracterizados pelo desequilíbrio entre as fases do sistema (FILOMENA, 2008).

Na Figura 2.13 os tipos básicos de falta do tipo *shunt* são apresentados, onde Z_f representa a impedância da falta fase-fase e Z_g é a impedância de falta fase-terra. Segundo (GRAINGER et. al., 1994), entre 70% e 80% dos defeitos típicos em sistemas elétricos de potência são do tipo fase-terra, enquanto 5% são faltas trifásicas.



(a) Falta Fase-Terra (b) Falta Fase-Fase

(c) Falta Fase-Fase-Terra (d) Falta Trifásica com Terra (e) Falta Trifásica sem Terra

Figura 2.13 – Modelos Básicos de Faltas

2.4.4 Métodos de Detecção de Faltas em Cabos Subterrâneos

Os métodos comumente utilizados para localizar falhas em cabos subterrâneos são basicamente divididos em dois grupos: o método traçador (localizador) consiste no rastreamento sistemático da rede de distribuição subterrânea para localizar os pontos defeituosos “percorrendo” os circuitos de cabos. Em contraste, o método de terminais (pré-localizador) utiliza uma ou ambas as extremidades dos cabos para determinar a localização

das falhas existentes sem que seja necessário rastrear o sistema de distribuição elétrica subterrânea de maneira exaustiva (YANG, 2008). Em geral, a identificação exata de um ponto deficiente no sistema de distribuição é realizada utilizando-se tanto o método de terminais quanto o método traçador. Inicialmente a localização da falha é estimada a partir de uma ou mais técnicas do método de terminais e logo depois se emprega uma técnica de rastreamento que irá determiná-la com exatidão.

2.4.4.1 O método dos terminais

Os métodos mais comuns de pré-detecção de falhas a partir dos terminais de cabos subterrâneos fundamentam-se na técnica de reflectometria no domínio do tempo. Esta técnica consiste no envio de sinais elétricos e eletromagnéticos através das extremidades do cabo subterrâneo e na análise do sinal refletido. Um algoritmo matemático é, em geral, empregado para determinar a magnitude e posição das reflexões esperadas determinando a forma de onda refletida para um pulso eletromagnético em um sistema livre de falhas. Ao realizar testes para diagnosticar falhas em um cabo subterrâneo, o engenheiro deve procurar por anomalias no pulso de onda refletido e tentar deduzir a localização e a natureza da falha a partir do sinal recebido (HO et. al., 1993). As principais técnicas para detecção de falhas em cabos subterrâneos que se fundamentam no método de terminais são apresentadas a seguir.

a) A técnica de reflectometria no domínio do tempo

Os reflectômetros no domínio do tempo (*Time domain reflectometers,* TDRs) transmitem pulsos de curta duração no cabo a ser testado. O tempo decorrido desde a transmissão de um pulso que percorre todo o comprimento do cabo e a reflexão produzida por desvios em sua estrutura homogênea são apresentados no display de uma tela. Qualquer superfície refletora, extremidade inicial do cabo, emendas, encaixes, transformadores, falhas, modificações no tipo de cabo, bem como sua extremidade final são mostrados em uma sequência temporal (IEEE Std, 2007).

Quando a velocidade de propagação de um pulso através de um cabo é inserida em um TDR, a distância entre a extremidade inicial e qualquer descontinuidade ou irregularidade pode ser determinada a partir do tempo de reflexão apresentado na tela de um osciloscópio, por exemplo. A leitura digital de um TDR fornece medidas de distância até a falha, bem como o comprimento total do cabo analisado.

O pulso de tensão injetado pelo gerador viaja pelo cabo subterrâneo e ao atingir a extremidade final encontra uma alta impedância. O pulso é então refletido positivamente e retorna para a extremidade inicial a partir da qual ocorre nova reflexão. As reflexões ocorrerão sucessivamente e serão progressivamente atenuadas à medida que a distância percorrida pelo pulso aumenta. Isso ocorre porque o pulso está perdendo energia por efeito jaule e a cada vez que encontra uma descontinuidade no cabo parte de sua energia é refletida e outra parte é transmitida fazendo com que os sucessivos trechos do cabo sejam atingidos por pulsos cada vez menores.

b) Detecção de descarga de pulso

Este método é válido para localizar falhas de alta resistência ou falhas intermitentes. Ele emprega o uso de um gerador de impulsos ou dispositivo de descarga capacitiva para causar uma ruptura na falha presente no cabo. O colapso gera uma onda viajante refletida no local da falha. Quando a primeira reflexão alcança o acoplador de tensão no local de medição, o tempo decorrido até a segunda reflexão é monitorado. Conhecendo-se a velocidade de propagação, a distância até a falha é determinada a partir do tempo decorrido entre as duas reflexões (BASCOM et. al., 1994).

c) Pulso do arco de reflexão

O pulso do arco de reflexão permite a localização de faltas em cabos com o menor nível de tensão possível, o que minimiza os riscos os danos ao cabo. Com um gerador de pulsos, faltas de alta resistência ou intermitentes podem ser temporariamente convertidas em falhas cuja resistência é menor do que a impedância característica do cabo (IEEE Std, 2007). A combinação de um TDR com um gerador de pulsos permite que se realize a localização da falha de baixa resistência temporária.

Nas medições iniciais, os pulsos do TDR não são refletidos pela falha intermitente ou de alta resistência e somente junções, emendas, transformadores, ou outras irregularidades presentes no cabo são visíveis. Nas medições subsequentes, o gerador de pulsos é ligado. A amplitude do pulso é tal que seja apenas suficiente para romper a falha e gerar um arco no ponto onde esta se encontra. O pulso do TDR será refletido pelo arco e uma imagem da falha de baixa resistência temporária, uma deflexão negativa, irá indicar a localização da falta no display. Uma vez que o arco cesse, a falta volta ao seu estado de alta resistência.

Em seguida, realiza-se uma comparação das imagens referentes às reflexões com e sem a utilização do gerador de pulsos. Durante os intervalos entre o arco, quando o gerador de pulsos está no modo de carga, a imagem das reflexões ocorridas no cabo, do início ao fim, é mostrada contendo todos os traços característicos das irregularidades presentes no cabo. Durante a ocorrência do arco, a falta de alta resistência é convertida a um estado de baixa resistência, cujo traço característico é a deflexão negativa apresentada no display do reflectômetro (IEEE Std, 2007). A localização da falta é facilmente determinada, não somente como uma distância em metros a partir de uma das extremidades.

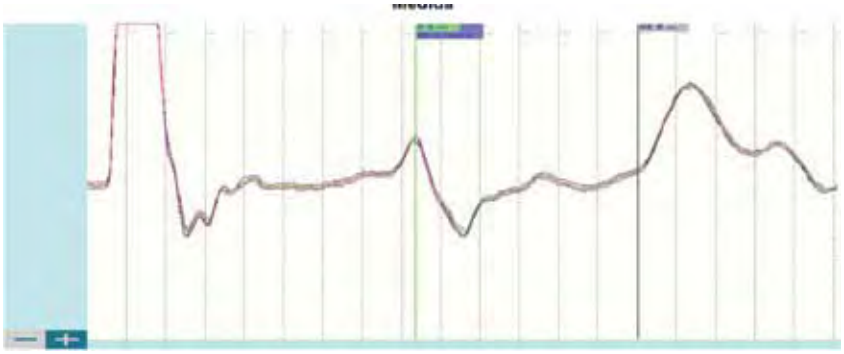


Figura 2.14 – Imagem de Ensaio TDR Cabo sem Defeito

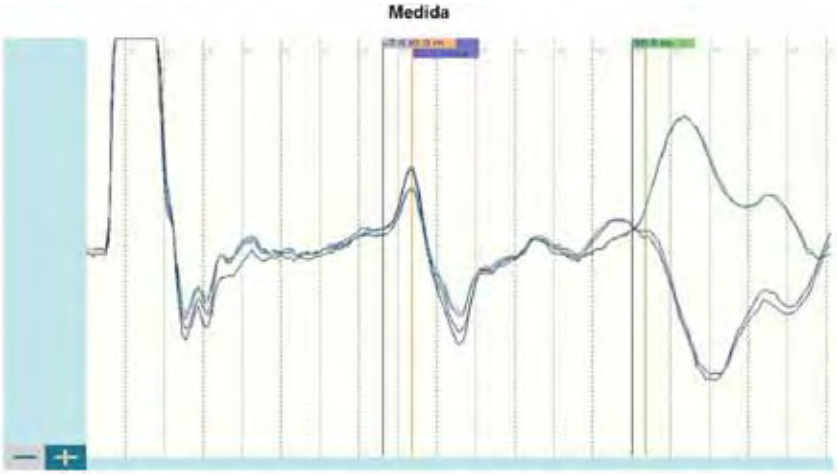


Figura 2.15 – Imagem de Ensaio TDR Cabo com Defeito

d) Comparação de amplitude

A detecção de faltas por meio de comparação de amplitude utiliza a relação entre a corrente do circuito supervisionado com um circuito de correntes iguais ou proporcionais em

condições de regime permanente. A Figura 2.16, (HOROWITZ; PHADKE, 1996), ilustra uma aplicação típica desta abordagem, caracterizada pela existência de duas linhas da rede paralelas.

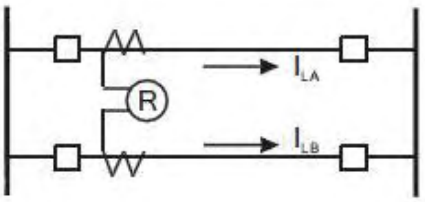


Figura 2.16 – Comparação de Magnitude entre Duas Linhas Paralelas

No caso da Figura 2.16, a detecção da falta ocorre quando existirem discrepâncias entre as magnitudes das correntes dos dois circuitos que sejam superiores a um valor de tolerância pré-estabelecido (ε). Supondo uma falta na linha B, esta é detectada caso a linha A esteja desligada e a condição estabelecida pela Equação 1 seja satisfeita:

$$|I_{LB}| \geq |I_{LA}| + \xi \qquad (01)$$

Onde $|I_{LA}| e |I_{LB}|$ são os módulos das correntes nas linhas A e B, respectivamente.

e) Comparação diferencial

O princípio de detecção através da comparação diferencial é baseado na lei de Kirchhoff dos nós, onde a soma das correntes em um mesmo nó é nula. A Figura 2.17 ilustra a aplicação dessa técnica em uma linha. Em condições normais de operação, a corrente I_1 é igual à corrente I_2. Em condições em que essas correntes sejam diferentes e cuja relação é superior a uma tolerância pré-estabelecida, uma falta interna à linha é detectada (HOROWITZ; PHADKE, 1996).

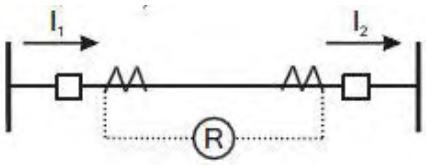


Figura 2.17 – Comparação Diferencial para Uma Linha

O método de comparação diferencial apresenta elevada sensibilidade, possibilitando a detecção de faltas com correntes de falta de baixa amplitude. Entretanto, essa abordagem requer o constante monitoramento das correntes em ambos os terminais, exigindo uma comunicação confiável e sem atrasos significativos entre os dados de ambas as extremidades. Em face de tal limitação, essa abordagem é usualmente adotada para a proteção de transformadores, geradores ou de linhas curtas.

f) Comparação de ângulo de fase

A detecção de faltas através da comparação de ângulo de fase visa a determinar o sentido da corrente em relação a uma referência angular, normalmente a tensão. Em condições normais de operação, o fluxo de potência em uma dada direção implica uma defasagem angular (θ) entre a tensão e corrente, equivalente ao fator de potência da carga. Para o fluxo de potência inverso, essa defasagem torna-se ($180 \pm \theta$).

Durante a ocorrência de uma falta, a defasagem angular entre os sinais de corrente e tensão será de $-\varphi$ e ($180 - \varphi$) para defeitos à frente e para falta reversa, respectivamente. A defasagem angular φ representa o ângulo da impedância de falta e é função dos dados de condutores que compõe a linha. Com base na defasagem angular entre tensão e corrente e do conhecimento do ângulo característico da linha, o processo de detecção de faltas é efetuado (HOROWITZ; PHADKE, 1996). Esta abordagem é comumente utilizada em sistemas susceptíveis a alterações do fluxo de potência em caso de faltas, como sistemas de distribuição do tipo de rede através do protetor de rede (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

g) Medida de distância

O processo de detecção de faltas por medida de distância faz uso do cálculo da impedância aparente medida pelo relé, a qual é diretamente proporcional ao comprimento da linha. Seguindo o princípio de funcionamento de relés de distância, é possível determinar a existência de perturbações internas à linha através de comparação entre a impedância aparente conhecida da linha e a impedância aparente medida pelo relé, calculada através dos fasores de tensão e corrente no terminal local (LI et. al., 2000).

A impedância aparente da linha é considerada um parâmetro constante e dependente das características construtivas da linha, como comprimento, diâmetro e espaçamento dos

condutores. A existência de faltas internas reduz a impedância aparente medida frente à impedância total da linha, permitindo a detecção da perturbação através dos relés de distância instalados na rede (HOROWITZ; PHADKE, 1996 e ZIEGLER, 2006).

h) Conteúdo harmônico

As formas de ondas ideais dos sinais de tensão e corrente são representadas por uma onda senoidal na frequência fundamental do sistema. Entretanto, devido à existência de elementos conectados ao sistema, o conteúdo harmônico nestes sinais não é nulo. Como exemplos, têm-se o ruído harmônico gerado por cargas não-lineares e as componentes de 3ª harmônica produzidas por grupos de geradores, as quais afetam as formas de onda em condições de regime permanente (HOROWITZ; PHADKE, 1996).

Durante a ocorrência de perturbações, o conteúdo harmônico característico gerado pelos distúrbios pode ser utilizado para a detecção e a classificação dos mesmos. Por exemplo, o conteúdo harmônico de ordem par é comumente utilizado para a identificação de condições operativas indevidas de transformadores. Como exemplo de aplicação prática, tem-se a corrente de *inrush* de transformadores, a qual é caracterizada pela elevada amplitude e pelo conteúdo de 2ª harmônica. Atualmente, os relés digitais possibilitam o bloqueio das unidades de sobrecorrente durante a energização de transformadores, impedindo a sua atuação caso seja detectada a existência de um percentual máximo de 2ª harmônica durante o processo de energização (ANDERSON, 1999).

i) Redes neurais artificiais

A utilização de redes neurais artificiais para a detecção e classificação de faltas tem como objetivo a identificação de distúrbios através da comparação de padrões existentes em faltas de mesmo tipo (GOMES et. al., 2009).

O trabalho proposto em (MORETO, 2005) utiliza uma técnica *off-line* para a detecção e a classificação de faltas. Para tanto, registros de diversas perturbações, com resistências de faltas lineares e não-lineares, assim como dados de casos não-faltosos, são utilizados durante o processo de treinamento da rede neural do tipo *feedforward* totalmente conectada.

Segundo (MORETO, 2005), o método de detecção proposto consiste na utilização do módulo dos fasores de sequência positiva, negativa e zero das componentes harmônicas de 1ª,

2ª, 3ª e 5ª ordem de corrente, como entradas de RNA e permite a detecção de faltas. O processo de detecção é realizado através de uma varredura ao longo de todo o intervalo de tempo dos sinais amostrados. Os sinais de entrada da rede neural são calculados a cada amostra, através de um conjunto que se desloca pelos dados amostrados. A saída da RNA consiste de 10 sinais binários, que representam os possíveis tipos de falta. O processo de detecção é concluído após a identificação da mesma saída por quatro amostras distintas, sendo a primeira amostra armazenada correspondente ao ponto de incidência de falta.

2.4.4.2 Métodos traçadores

A localização de falhas em cabos a partir do método de rastreamento exige que a rota do cabo seja percorrida para localização de um sinal sonoro ou eletromagnético. Estes métodos são mais úteis para identificar o ponto defeituoso após a realização de uma determinação aproximada da localização da posição da falha. Em geral, duas pessoas são necessárias para utilizar as técnicas de rastreamento. Uma delas opera o equipamento gerador de sinais enquanto a outra "percorre o caminho do cabo". A fim de detectar o sinal de rastreamento ao longo do trajeto do cabo, um trabalhador de campo deve segui-lo ou entrar em bueiros (pontos de inspeção) para acessá-lo.

Algumas técnicas de rastreamento também podem ser utilizadas para identificar o cabo onde existem defeitos. Conhecer o trajeto percorrido pelo cabo é importante porque muitas técnicas de rastreamento produzem sinais que só podem ser detectados dentro de um alcance limitado a partir do cabo. Assim, grandes desvios em sua rota durante o rastreamento de falhas podem tornar a localização de uma falha muito difícil.

a) Detecção acústica

O dispositivo utilizado para detectar falhas a partir deste método consiste basicamente em um gerador de pulsos de alta tensão, tal como uma fonte de alimentação de corrente contínua, um capacitor e algum tipo de chave, ambos de alta tensão. A fonte de alimentação é utilizada para carregar o capacitor e, em seguida, um terminal de contato descarrega o capacitor no cabo que está sendo testado. Se a tensão for suficientemente alta para romper a falha, a energia armazenada no capacitor é rapidamente descarregada na falha através de um arco criando um som detectável ou vibração no solo. Essa vibração no solo depende do

quanto a tensão injetada pode elevar-se e de quanta energia é descarregada na falha (STAKER, 2003). A Figura 2.18 ilustra um modelo de gerador de onda.

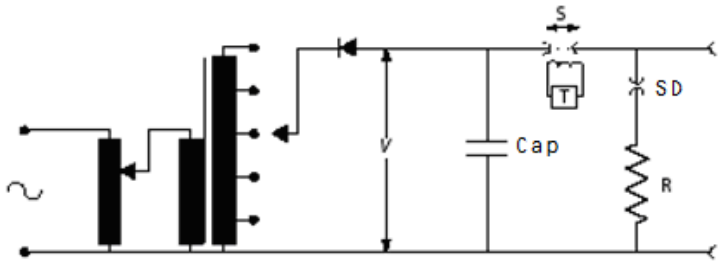


Figura 2.18 – A Constituição Básica de um Gerador de Onda (CLEGG, 1993)

Onde:

- C_{ap} - Capacitor;
- R - Resistor;
- S - Chave;
- SD - Chave de descarga; e
- T - Circuito para controlar o tempo do solenóide.

O gerador de onda funciona carregando o capacitor (C_{ap}) com a chave (S) aberta. A chave apresenta contatos fortalecidos para que tenha longa vida útil e é operada por um solenóide de modo que possa ser aberta ou fechada por um tempo determinado através de um circuito (T). Isso possibilita que o operador varie o ritmo de fechamento da chave em um dado terminal a cada 1 a 10 segundos, aproximadamente. Os geradores de onda modernos também incluem uma chave de descarga (SD) que descarrega a saída para a terra por meio de uma resistência (R) quando o instrumento é desligado (CLEGG, 1993).

O valor da capacitância C_{ap} é, em geral, selecionado dentre poucos a algumas centenas de *microfarads* por meio da alternância entre associações em série, paralelas ou mistas de capacitores. Esta seleção está relacionada com a derivação da tensão e interrupções apropriadas. Este arranjo é projetado para fornecer uma saída constante de energia, seja por meio da combinação de alta tensão e baixa capacitância ou alta capacitância e baixa tensão (CLEGG, 1993).

Os cabos subterrâneos estão geralmente localizados entre meio e um metro de profundidade do solo. Por este motivo, quando uma falha é encontrada o som do arco de corrente formado acaba sendo amortecido. Algumas vezes, é possível perceber este som sem

o auxílio de aparelhos, contudo, a utilização microfones e receptores amplificadores e sensíveis tornam-se necessária com muita frequência.

O processo de geração de ondas é repetido várias vezes durante um intervalo de tempo determinado para que o operador possa caminhar ao longo da zona suspeita, identificar e marcar o local exato de ocorrência da falha. Quanto maior for a tensão aplicada, mais audível será o som produzido e, consequentemente, mais fácil será a localização da falha. Em alguns casos, levam-se horas ou mesmo dias para que um defeito seja localizado e em todo este período o cabo é submetido a altas tensões que podem causar danos ao isolamento do cabo e iniciar um processo capaz de gerar novas falhas (STAKER, 2003). Assim, é preciso que sejam utilizados previamente outros métodos capazes de identificar a área onde a falha esteja localizada e deste modo reduzir a quantidade de pulsos necessários para sua detecção exata.

b) Potencial DC da blindagem

Este método é válido para localizar falhas de curto-circuito e alta impedância quando a mesma ocorre do condutor para o isolamento. Com este método, um voltímetro é conectado entre o condutor e o isolamento enquanto uma tensão contínua, CC, é aplicada ao isolamento por meio de dois eletrodos. Quando os eletrodos estão entre o voltímetro e a falha, o voltímetro indicará uma tensão, porém quando os eletrodos estão além da falha, nenhuma tensão será medida (BASCOM et. al., 1994).

c) Ondas eletromagnéticas

Este método é válido para localizar falhas de alta impedância. Utilizando um gerador de impulsos ou outros dispositivos para aplicar um surto no cabo, a falha pode ser encontrada utilizando-se um rádio ou outro dispositivo para detectar a onda eletromagnética (interferência RF) gerada no arco.

d) Rampa de tensão

Este método é válido para localizar falhas de curto circuito ou alta impedância em cabos de distribuição secundária (sem isolamento). A localização da falha é indicada por um pico de tensão que é medido quando um cabo de teste é conectado a um transformador tipo

pedestal por meio de um voltímetro. A tensão medida apresentará um pico no ponto da falha e decrescerá à medida que o operador afasta-se dela.

2.4.4.3 Integrando ferramentas

A utilização de diversas ferramentas em conjunto para auxiliar na localização de defeitos em sistemas subterrâneos é muito usada atualmente pelas concessionárias, devido a complexidade do estudo e também da necessidade de uma melhor precisão para realização do reparo, uma vez que perfurar ruas à procura de um defeito, é muito custoso.

O estudo apresentado em (SOUZA et. al., 2011), apresenta um dispositivo móvel que têm como vantagem a integração e a portabilidade de todos os equipamentos adequados para realização de diversos testes para localização de falta, como ensaio de impulso, ensaio acústico, entre outros. Para aprimorar a operação do dispositivo móvel, foi desenvolvido um sistema inteligente com redes neurais para tratamento e análise dos dados gerados pelos ensaios. Esta união fez com que a concessionária melhorasse a precisão do local com defeito, reduzisse o tempo de preparação para ensaios, e também reduzisse o tempo de restauração da rede.

As Figuras 2.19 e 2.20 apresentam o dispositivo móvel e uma das análises realizada pelo sistema inteligente desenvolvido, respectivamente.

Figura 2.19 – Laboratório Móvel no Local de Ensaio (SOUZA et. al., 2011)

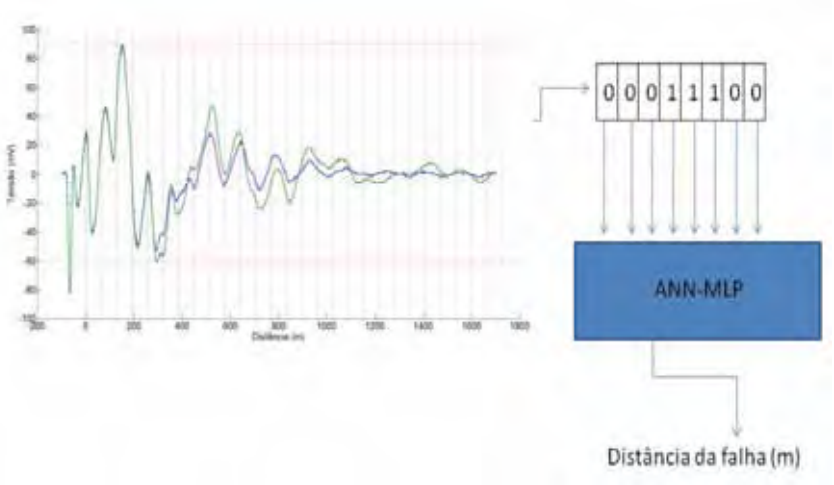


Figura 2.20 – Esquema Proposto para Localização de Falhas Utilizando Redes Neurais Artificiais e Técnicas de Janelamento Fixo do Sinal (SOUZA et. al., 2011)

3 PARTICULARIDADES DO PSCAD/EMTDC, DO MATLAB E DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

3.1 PSCAD

A necessidade de uma ferramenta de simulação que fosse suficientemente poderosa e flexível para estudar o Sistema Elétrico do Rio Nelson HVDC, no Canadá, levou ao desenvolvimento das primeiras versões de software de simulação. Como resultados de investigações na área dos sistemas de potência iniciados em 1988, surge em 1993 pela primeira vez o PSCAD® lançado para o sistema operativo Unix, evoluindo desde então, para o sistema operativo MS Windows.

O *Power Systems Computer Aided Design*, PSCAD®, é um software de interface gráfica que permite simular respostas transitórias, este software também conhecido como PSCAD®/EMTDC™, sendo que o *Electromagnetic Transients including* DC, EMTDC™, permite a representação e a resolução de equações diferenciais (para os sistemas eletromecânicos e eletromagnéticos) no domínio do tempo. Este software potencializa o ambiente de simulação gráfica, na medida em que permite aos usuários construir de forma eficiente circuitos esquemáticos, executar a simulação e analisar os resultados da mesma.

Portanto, o PSCAD® é usado extensivamente para muitos tipos de estudos de simulação de sistemas AC e DC, tornando-se num instrumento indispensável à análise de projetos de energia. É uma ferramenta multi-propósito, dado que é igualmente aplicável nas áreas dos Sistemas de Energia, na simulação de projetos de eletrônica, na análise de qualidade de energia, nos sistemas de proteção e estudos de planejamento do sistema. A Energia Elétrica e os Sistemas Eletrônicos assumem um papel com grande preponderância nos sistemas de potência, assim existe a necessidade de realizar simulações de forma eficaz e eficiente. Deste modo, o PSCAD®/EMTDC™, adota um papel de grande relevância, uma vez que permite efetuar a modelagem e análise do sistema de energia (DAUD et.al., 2008).

A biblioteca Máster do PSCAD, que possui mais de 280 componentes flexíveis e validados, permite a construção de modelos não-lineares avançados de sistemas, combinando geração, transmissão, distribuição, eletrônica de potência e controle de circuitos em um ou vários modelos de grande porte.

Por possuir um conjunto completo de controles e lógica de controle, este software fornece ao usuário a possibilidade de interagir com seus modelos de sistemas de potência.

Quando a simulação é executada, pode-se controlar eventos como a interação de seus componentes.

A facilidade de visualizar gráficos permite ao usuário conseguir observar as dinâmicas da simulação. Um dos exemplos é a plotagem de gráfico XY que nos permite a comparação de um conjunto de dados em relação a outro, ajudando na análise dos dados adquiridos (TENG et. al., 2010).

Utilizando a comunicação entre pacotes, pode-se acessar outros pacotes como do MATLAB, estabelecendo a comunicação entre as duas plataformas. O MATLAB é um software que possui um grande número de funções matemáticas e blocos de controle de sistema, e estes podem ser a acessados usando linhas de comando no MATLAB ou diretamente através de um arquivo “m-file”.

3.2 MATLAB

MatLab é uma ferramenta computacional criada pela empresa Norte-Americana *The Mathworks, Inc.* (MATSUMOTO, 2004). A grande vantagem do MatLab é, sem dúvida, a sua facilidade de operação, as suas quase ilimitadas funções e aplicações e a possibilidade de operar com os mais variados tipos de linguagem. O nome Matlab deriva de *MATrix LABoratory*. É um sistema interativo indicado para o cálculo numérico, baseado na representação matricial para a resolução de problemas, no âmbito científico e de engenharia, e na sua visualização gráfica.

Este sistema permite a resolução de muitos problemas numéricos em apenas uma fração do tempo que se gastaria para escrever um programa semelhante em linguagem Fortran, Basic ou C. Além disso, as soluções dos problemas são expressas no MATLAB quase exatamente como elas são escritas matematicamente.

O MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional.

Outra grande vantagem deste programa é o seu reduzido número de comandos, o que para além de ser bastante útil para o rápido desenvolvimento dos trabalhos, permite-nos concentrarmo-nos mais no problema em si do que nos comandos do programa.

Atualmente o MATLAB dispõe de uma biblioteca bastante abrangente de funções matemáticas, geração de gráficos e manipulação de dados que auxiliam muito o trabalho do

programador. E ainda possui uma vasta coleção de bibliotecas - denominadas *toolboxes* - para áreas específicas como: equações diferencias ordinárias, EDP, estatística, processamento de imagens, processamento de sinais, finanças, RNA, SVM.

A linguagem e o ambiente de programação MATLAB permitem ainda que o usuário possa escrever suas próprias bibliotecas em MATLAB. Assim, o usuário pode enriquecer a biblioteca de recursos disponíveis, incorporando a ela novas funções.

3.3 Redes Neurais

As redes neurais foram inspiradas na estrutura do cérebro. O cérebro é formado por um grande número de células denominadas "neurônios". Cada neurônio recebe impulsos de outros neurônios através de vários "dentritos". Dependendo dos impulsos recebidos, o neurônio transmite um sinal a outros neurônios, por meio de seu "axônio", que se conecta a dentritos de outros neurônios. Da mesma forma que o cérebro, as redes neurais artificiais são compostas por elementos; cada um desses elementos recebe uma série de entradas e gera uma saída, sendo que a saída é uma função relativamente simples das entradas.

Redes Neurais Artificiais (RNAs) são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. Uma RNA é caracterizada pela sua topologia que determina o padrão de conexão entre os neurônios; pelo seu treinamento que ajusta os pesos e conexões dos neurônios; e pela sua função de ativação que é responsável pelo processamento do conjunto de informações recebidas e pela saída do neurônio (ELLER, 2003). As RNAs são capazes de reconhecer e classificar padrões, resolver problemas complexos, realizar processos indutivos e dedutivos, entre outros. Atualmente, as RNAs vêm sendo aplicadas em diversas áreas, obtendo bons resultados (TAFNER, 2008).

3.3.1 Comparação entre Redes Neurais e Métodos Estatísticos

As redes neurais fornecem uma alternativa aos métodos estatísticos convencionais. Da mesma forma que as regressões lineares, as redes neurais são usadas para aproximações de funções. E da mesma forma que as análises discriminantes e regressões logísticas, as redes neurais são usadas para classificação. A vantagem das redes neurais é que são capazes de modelar funções extremamente complexas. Em meados do século XX, quando surgiram as

redes neurais, os métodos de otimização linear já eram bem conhecidos, mas algoritmos eficazes para treinamento das redes demoraram mais alguns anos para surgir. Contudo, atualmente, existe uma grande variedade de algoritmos sofisticados para treinamento de redes neurais, o que as torna uma alternativa mais interessante para resolução de problemas quando comparadas à métodos convencionais.

3.3.2 Tipos de Redes Neurais

Há vários tipos de redes neurais, que se diferenciam pela estrutura, pelos tipos de cálculos efetuados dentro dos neurônios e pelos algoritmos de treinamento. Um dos tipos de redes oferecidos pelo NeuralTools do Matlab é a Rede Multi-Layer Feedforward. Com as redes MLF, também conhecidas como MLP (*Multi-Layer Perceptron*), o usuário pode especificar se deve haver uma ou duas camadas de neurônios ocultos e quantos neurônios as camadas ocultas devem conter. Outros tipos de rede oferecida são as Redes Neurais de Regressão Generalizada e Redes Neurais Probabilísticas; essas redes se interrelacionam estreitamente, sendo que o primeiro tipo é usado para previsão numérica e o segundo para previsão de categorias/classificação. No caso das redes GRNN/PNN, o usuário não precisa tomar nenhuma decisão quanto à estrutura da rede. Essas redes sempre têm duas camadas ocultas de neurônios, sendo que um neurônio em caso de treinamento encontra-se na primeira camada oculta; o tamanho da segunda camada depende de certos fatores relacionados aos dados de treinamento. Outro tipo de rede é são as redes RBF (*Radial Basis Function*). São redes de aprendizado supervisionado e multicamada, que buscam ajustar uma superfície que melhor represente os dados de treinamento.

Esse tipo de rede é constituído de 3 camadas:

- 1ª camada: recebem informação do meio externo, porém não executa nenhuma operação sobre esses dados;
- 2ª camada: executa uma função de base radial sobre os dados recebidos da 1ª camada; e
- 3ª camada: executa uma função linear sobre os dados recebidos da 2ª camada.

3.3.3 Redes Multi-Layer FeedForward

Nas redes de topologia *feedfoward* o sinal da rede é propagado em apenas um sentido, isto é, nenhuma saída retorna a uma camada anterior.

As redes *feedforward* multicamadas se caracterizam por possuir uma ou mais camadas intermediárias. Geralmente, esta topologia é aplicada em reconhecimento de padrões e como aproximador universal de funções, uma vez que se podem aproximar funções não-lineares. No MatLab as funções *newff* (*feed-forward network*) e *newpr* (*pattern recognition network*) representam a topologia *FeedForward*.

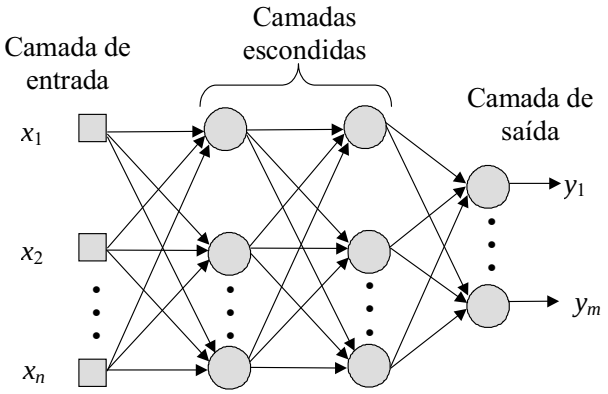


Figura 3.1 – Representação de uma Rede *FeedForward* Multicamadas (HAYKIN, 2001)

3.3.3.1 Treinamento das RNAs

Uma das principais características das RNAs é sua capacidade de aprender a partir de seu ambiente, e em seguida generalizar soluções. O conhecimento contido na rede está representado na sua estrutura e nos pesos sinápticos das conexões entre os neurônios. Deste modo, ao se modificar os pesos, pode-se atualizar o conhecimento contido, induzindo a adaptação do sistema. Este processo de modificação dos pesos das conexões é denominado treinamento.

O treinamento pode ser classificado como supervisionado e não-supervisionado. No treinamento supervisionado é necessário que a rede disponha de pares de conjuntos de entradas e de saídas desejadas, por isso é preciso auxílio de um supervisor externo para que a rede seja treinada. No treinamento não supervisionado é preciso apenas do conjunto de entradas e assim a rede desenvolve a habilidade de formar representações internas para codificar características de entrada e criar saídas automaticamente. Pela capacidade de se auto-organizar este treinamento não precisa de um supervisor.

Uma época de treinamento é definida como sendo a apresentação à rede, de todos os pares, entrada e saída, do conjunto de algoritmo e rede utilizados. Normalmente, a rede é

treinada com cerca de 80% a 90% dos dados coletados, o restante dos dados, de 10% a 20% são usados para validação da modelagem neural proposta (HAYKIN, 2001).

Para a solução de um problema, o treinamento segue um conjunto de passos bem definidos. O algoritmo de treinamento mais utilizado é o *Backpropagation* ou Regra Delta Generalizada. Este é um algoritmo supervisionado que utiliza pares entradas e saídas desejadas para ajustar os pesos sinápticos da rede, por meio de um mecanismo de correção de erros. Esse processo de aprendizagem ocorre em duas fases, em que cada fase percorre a rede em um sentido (HAYKIN, 2001):

- Passo *Forward*: o estímulo é apresentado à entrada da rede, e as informações fluem pela rede, até alcançar a camada de saída. Durante o *Forward* não há alteração dos pesos sinápticos.
- Passo *Backward*: após o passo *Forward*, o erro é calculado na saída da rede e é propagado no sentido da camada de entrada. Durante este passo ocorre a atualização dos pesos sinápticos da rede, a saída adquirida é comparada à saída desejada para esse padrão particular. Caso esta não estiver correta, o erro é calculado. Em seguida, esse erro é propagado a partir da camada de saída até a camada de entrada, assim, os pesos sinápticos das conexões das unidades das camadas internas vão sendo alterados conforme o erro é retropropagado. Daí que vem o nome *backpropagation*.

A Figura 3.2 ilustra estes dois passos, *Forward* e *Backward*.

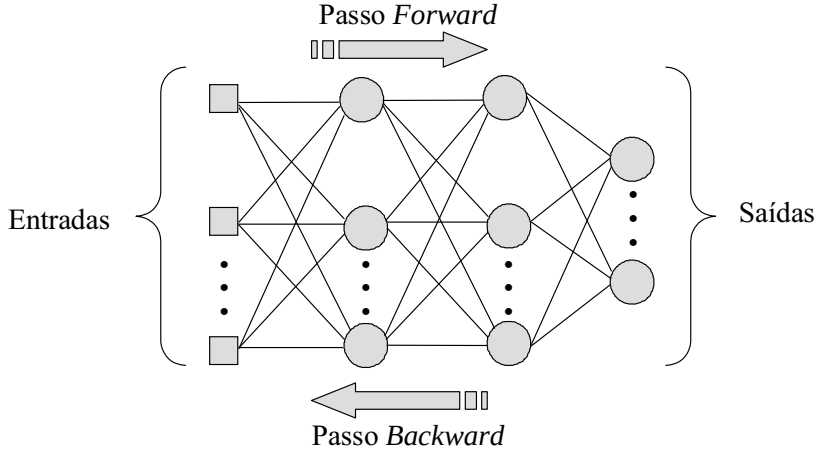


Figura 3.2 – Representação dos Passos *Forward* e *Backward*

3.3.3.2 Tipos de treinamento

a) Classe do algoritmo de treinamento

Os Algoritmos de treinamento de *perceptrons* multicamadas podem ser classificados nos seguintes itens:

- Primeira classe: algoritmos que não requerem derivação, apenas avaliação da função em diferentes pontos do espaço. São chamados métodos sem diferenciação.
- Segunda classe: faz uso da derivada primeira a ser minimizada. São chamados métodos de primeira ordem.
- Terceira classe: são os métodos de segunda ordem, e utilizam informações sobre a derivada segunda.
- Método empírico: consiste no ajuste de pesos usando método de tentativas e erros.

A Figura 3.3 mostra a distribuição de alguns treinamentos nestas classes.

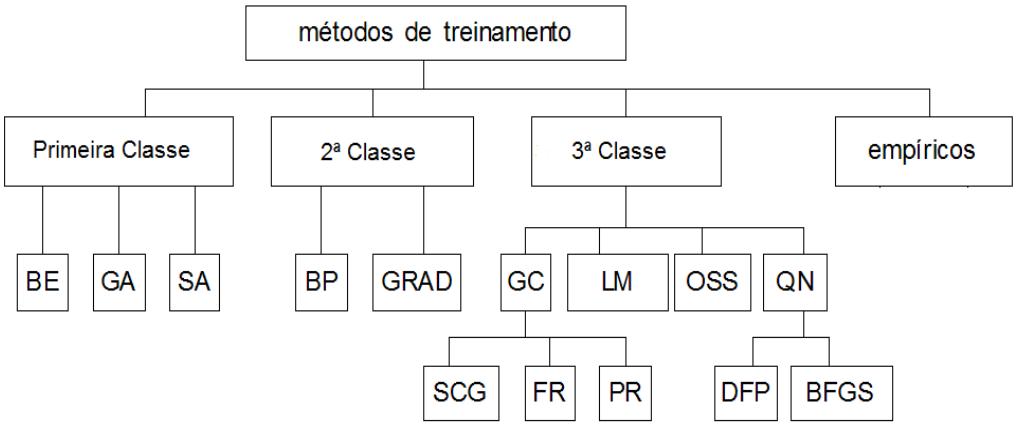


Figura 3.3 – Divisão dos Métodos de Treinamento (SHEPHERD, 1997)

Onde as siglas significam:

- BE – *Exhaustive Search*.
- GA – *Genetic Algorithms.*
- SA – *Simulated Annealing.*
- BP – *BackPropagation.*
- GRAD – *Gradient.*

- GC – *Conjugate Gradient*:
  - SCG – *Scaled Conjugate Gradient*;
  - FR – *Fletcher-Reeves*; e
  - PR – *Polak-Ribiére*.
- LM – *Levenberq Marquardt.*
- OSS – *One Step Secant*.
- QN – *Quasi Newton*.
- DFP – *Davidon-Fletcher-Powell*.
- BFGS – *Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*.

3.3.3.3 Função de ativação

As funções de ativação exercem papel fundamental no tratamento dos dados pela RNA, ativando ou não a saída, dependendo da soma ponderada das suas entradas, ou seja, são as funções de ativação que definem quais entradas são significativas para determinado tipo de treinamento.

As principais funções de ativação e suas notações no MatLab são:

Função degrau binária - *hardlim*

$$\text{É definida por: } g(u) = \begin{cases} 1, & se \quad u \geq 0 \\ 0, & se \quad u < 0 \end{cases} \qquad (02)$$

A Figura 3.4 mostra a representação gráfica desta função.

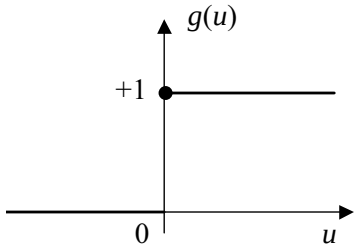


Figura 3.4 – Função Degrau Binária

Função degrau bipolar - *hardlims*

$$\text{É definida por: } g(u) = \begin{cases} +1, & se \quad u \geq 0 \\ -1, & se \quad u < 0 \end{cases} \qquad (03)$$

A Figura 3.5 mostra a representação gráfica desta função.

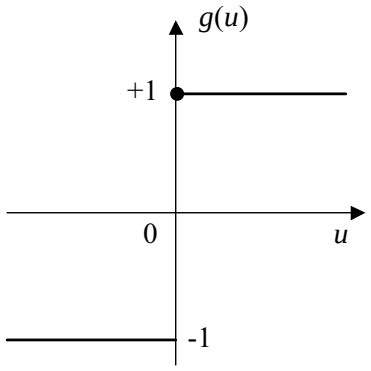


Figura 3.5 – Função Degrau Bipolar

Função rampa - *purelin*

$$\text{É definida por, sendo a} \neq 0\text{: } g(u) = \begin{cases} +1, & se \quad u \geq a \\ u, & se \quad -a < u < a \\ -1, & se \quad u \leq -a \end{cases} \qquad (04)$$

A Figura 3.6 mostra a representação gráfica desta função.

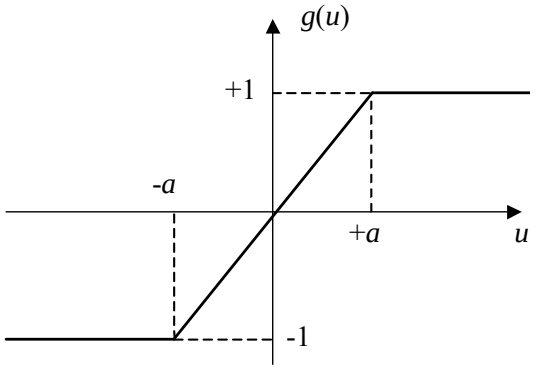


Figura 3.6 – Função Rampa

Função sigmóide - *logsig*

É definida por, sendo β uma constante: $g(u) = \frac{1}{1 + e^{(-\beta u)}}$ *(05)*

A Figura 3.7 mostra a representação gráfica desta função.

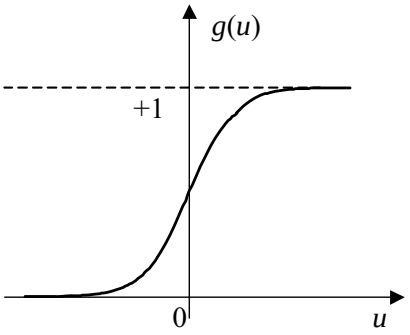


Figura 3.7 – Função Sigmóide

Função tangente hiperbólica - *tansig*

É definida por: $g(u) = \tanh(u) = \frac{1 - e^{-u}}{1 + e^{-u}}$ *(06)*

A Figura 3.8 mostra a representação gráfica desta função.

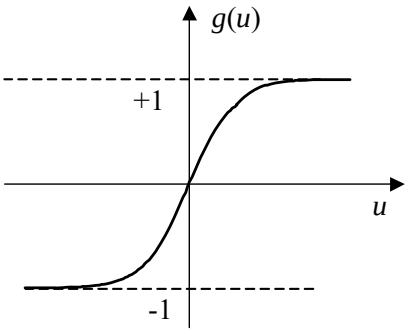


Figura 3.8 – Função Tangente Hiperbólica

3.3.4 Redes de Base Radial

Uma maneira de projetar redes neurais supervisionadas é através da utilização de redes de função de base radial (BUHMANN, 2006).

O problema de uma rede RBF é visto como um problema de ajuste de curva (aproximação) em um espaço de alta dimensionalidade. De acordo com este ponto de vista, aprender é equivalente a encontrar uma superfície, em um espaço multidimensional, que forneça o melhor ajuste para os dados de treinamento.

As redes RBF, como as redes MLP, são redes multicamadas, alimentadas adiante. A principal diferença entre os dois tipos de rede é que a função de ativação sigmóide, dos nodos da camada oculta, é alterada por outra classe de função. A construção de uma rede RBF, em sua forma mais básica, envolve três camadas com papéis totalmente diferentes. A camada de entrada é constituída de nós fontes que conectam a rede ao seu ambiente e não executam nenhuma função sobre os dados de entrada. A segunda camada, a única camada oculta da rede, aplica uma transformação não linear do espaço de entrada para o espaço oculto. Esta camada transforma o conjunto de padrões não linearmente separáveis em conjunto de saídas linearmente separáveis. A camada de saída é linear, ela procura classificar os padrões recebidos da camada anterior. A Figura 3.9 ilustra o diagrama básico de uma rede RBF.

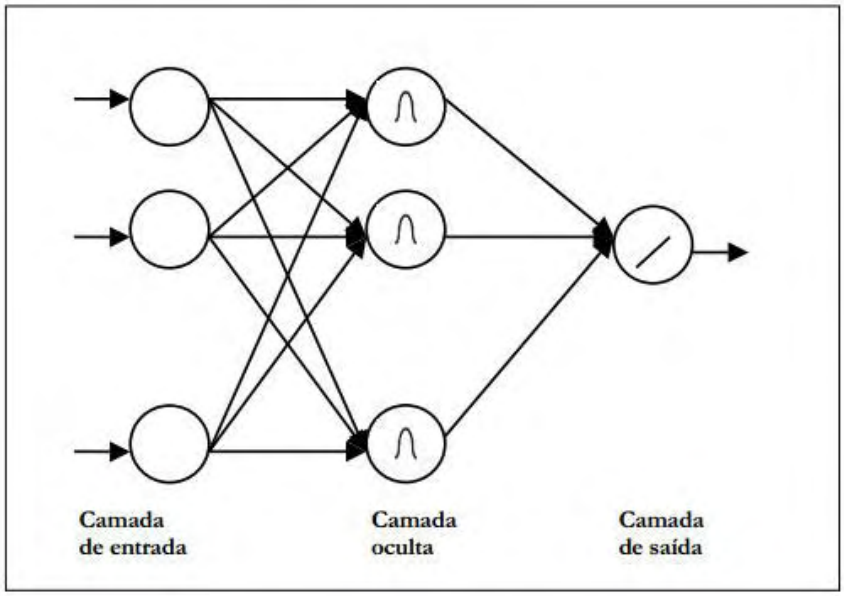


Figura 3.9 – Diagrama Básico de uma Rede RBF

3.3.5 Redes Neurais de Regressão Generalizadas

Uma rede neural de regressão generalizada (GRNN) é freqüentemente usada para aproximação de funções e tem uma camada base radial e uma camada linear especial (HEIMES et.al., 1998).

A GRNN foi introduzida como uma rede neural baseada em memória que armazena todos os dados de treinamento, independentes e dependentes, disponíveis para um mapeamento. Quando um novo vetor de entrada é apresentado, esta rede usa uma função distância para calcular a média ponderada dos dados de treinamento dependentes cujos parâmetros independentes estão próximos ao vetor de entrada (HEIMES et.al., 1998).

A GRNN é vista como um interpolador o qual interpola a saída desejada dos nós da camada padrão que estão localizados próximos do vetor de entrada no espaço de entrada.

A Figura 3.10 apresenta a arquitetura das redes GRNN.

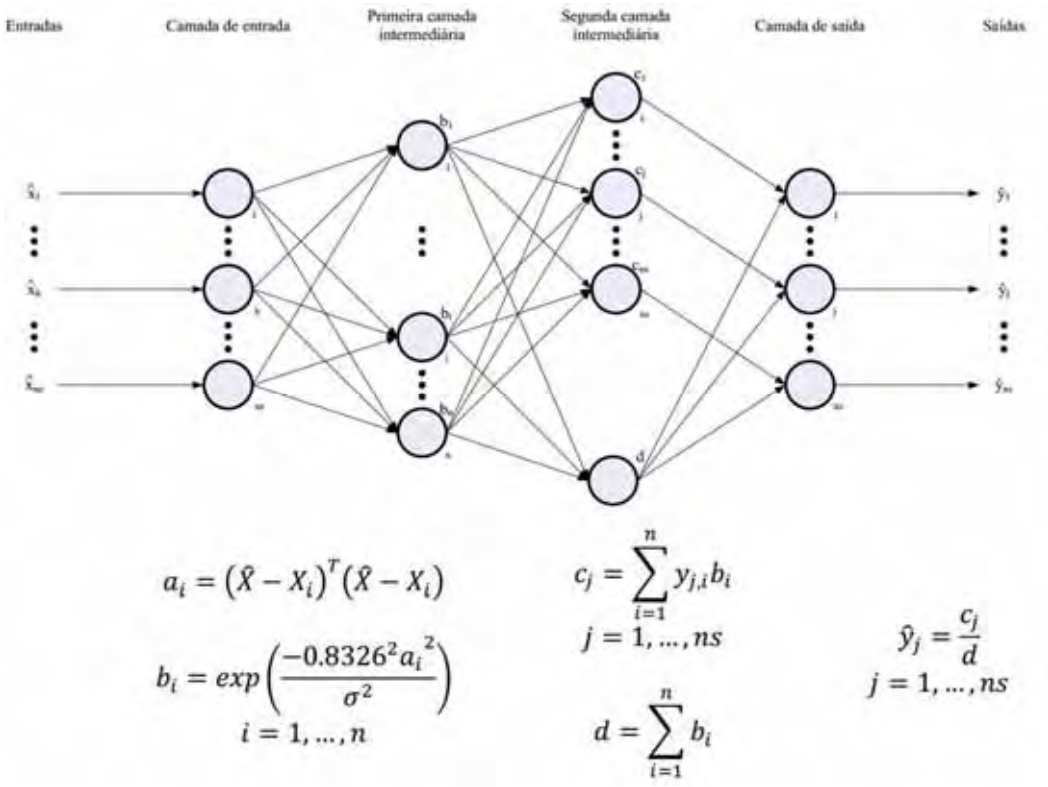


Figura 3.10 – Arquitetura da Rede GRNN

3.3.6 Redes Neurais Probabilísticas

As redes PNN (*Probabilistic Neural Networks*) são uma variação das redes RBF. Estas redes separam os dados em um número específico de categorias de saída e são conhecidas por sua habilidade de treinamento rápido. Segundo (SPECHT, 1990) as redes PNN são indicadas para tarefas de classificação, porque elas possuem vantagens em relação aos métodos de retropropagação. As principais vantagens das redes PNN são: treinamento é realizado em apenas um passo e garantia de que a superfície de decisão se aproxima dos limites de uma decisão Bayseana ótima à medida que o número de exemplos de treinamento cresce (SPECHT, 1990). Outra grande motivação para a utilização das redes PNN é o curto tempo necessário para treiná-las quando comparado com o tempo necessário para treinar redes MLP. A principal desvantagem das redes PNN é que todos os exemplos de treinamento devem ser armazenados e usados para classificar novos padrões. Entretanto, esta desvantagem não é um problema atualmente, pois o custo de memória é baixo e os computadores dispõem de grande capacidade de armazenamento. As redes PNN implementam a estratégia de decisão Bayseana para classificar os vetores de entrada. A Figura 3.11 mostra a arquitetura básica de uma rede PNN para classificação dos padrões de entrada X em duas classes. As redes PNN são divididas em quatro camadas: camada de unidades de entrada, camada de unidades de padrões, camada de unidades de soma e camada de unidades de saída. Como nas redes MLP, as unidades da camada de entrada não realizam operações sobre os vetores de entrada.

A rede é treinada criando-se uma unidade na camada de padrões para cada um dos padrões do conjunto de treinamento e fazendo com que o vetor de peso dessas unidades seja igual ao correspondente padrão do conjunto de treinamento. Depois disso, as saídas das unidades da camada de padrão são conectadas com as unidades da camada de soma da classe correspondente.

Em essência, a rede opera pela soma das saídas dos nodos da camada de padrões, que devido à utilização de funções de ativação Gaussianas, agrupam os padrões de entrada em classes. Assim, a rede PNN calcula a função de distribuição da probabilidade a posteriori para uma classe simples, avaliando o ponto definido pelo padrão de entrada. Este ambiente é útil para aplicações de classificação, onde se deseja estimar a probabilidade de um novo padrão ser membro de alguma classe pré-definida.

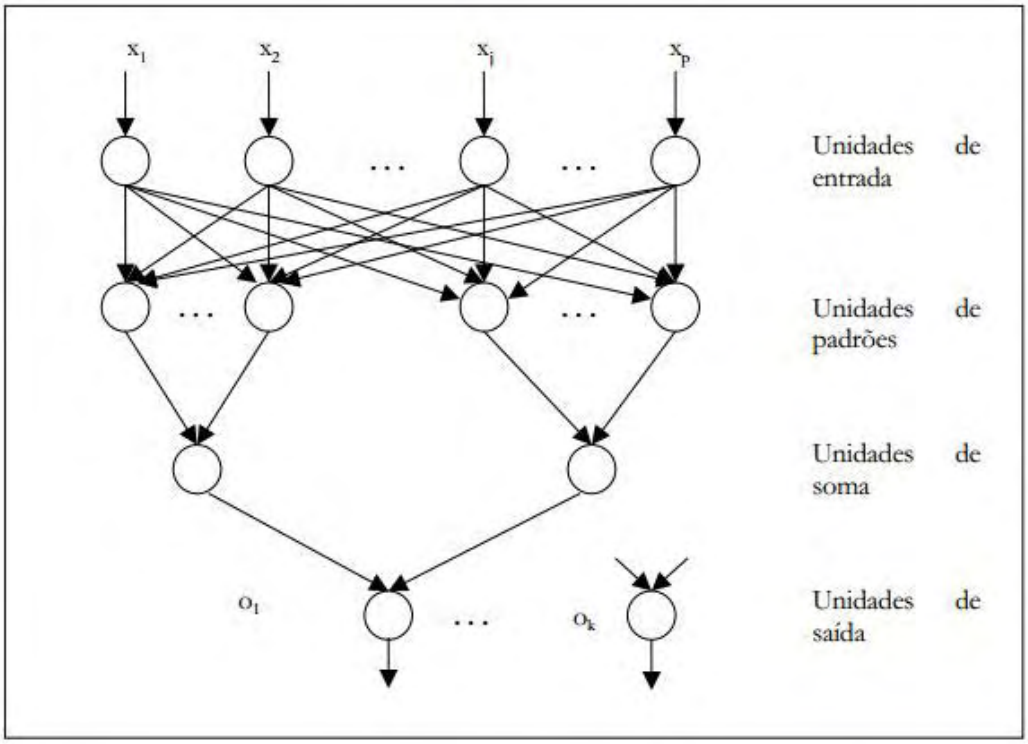


Figura 3.11 – Arquitetura Básica de uma Rede PNN

3.3.7 Comparação entre Redes MLP, RBF, GRNN/PNN

Cada tipo de rede neural oferece vantagens e desvantagens, conforme exposto a seguir:

a) Vantagens das redes MLP:

- São menores, portanto as previsões são mais rápidas;
- São mais confiáveis fora dos intervalos dos dados de treinamento;
- São capazes de fazer generalizações a partir de conjuntos de treinamento muito pequenos;
- Constroem aproximações globais;

b) Vantagens das redes RBF:

- Relativa simplicidade do processo de treinamento e a eficiência computacional;
- Constroem aproximações locais;
- Tempo de treinamento menor que as MLP;

c) Vantagens das redes GRNN/PNN:

- Possuem um treinamento mais rápido do que as MLP;
- Não requerem especificação de topologia;
- Além de efetuar classificação, as redes PNN retornam as probabilidades de o caso se enquadrar em diferentes categorias dependentes;

4 METODOLOGIA

Segundo as concessionárias de energia, faltas entre fase-terra são as faltas mais frequentes nos sistemas subterrâneos. Uma correta localização do problema traz uma grande economia no reparo, pois muitas vezes as equipes técnicas têm que perfurar as ruas à procura do cabo danificado, além de uma economia com a diminuição de multas aplicadas pela ANEEL, por causa da melhora dos índices de DEC e FEC.

As concessionárias têm trabalhado ultimamente com um erro aproximado de 100 m, ou seja, as equipes técnicas precisam perfurar em média 100 m de ruas até encontrar o cabo defeituoso. Mas com o avanço das metodologias aplicadas, e dos aparelhos de medição, juntamente com um alto investimento em pesquisa para melhorar o estudo de localização de faltas, algumas concessionárias já estão trabalhando com um erro aproximado de 30 m. (SOUZA et.al., 2011).

O intuito deste trabalho é integrar o software PSCAD/EMTDC e ferramentas inteligentes para auxiliar na localização de faltas em sistemas subterrâneos de energia, diminuindo o tempo de restauração na ocorrência de um problema.

A metodologia aplicada neste trabalho pode ser dividida em 11 (onze) partes que se seguem:

1) Estudo da Localização da Falta através do Algoritmo Proposto em (XIA YANG, 2008);
2) Criação de Banco de Dados: Falta Monofásica Fase-Terra, com Cabo Simples e com Resistência de Falta Fixa;
3) Avaliação de Redes Neurais: MLP, RBF, GRNN e PNN
4) Avaliação de Configuração das RNA;
5) Avaliação da Quantidade de Dados de Treinamento para cada Tipo de Treinamento da RNA;
6) Obtenção do Banco de Dados Teste e Discussão dos Resultados;
7) Análise da Influência dos Dados de Entrada;
8) Comparação: Rede Neural X Algoritmo Proposto em (XIA YANG, 2008);
9) Saída da RNA: Resistência de Falta;
10) Duas Saídas: Local da Falta e Resistência de Falta; e
11) Avaliação do Desempenho da Variação da Quantidade de Dados de Entrada.

4.1 Estudo da Localização da Falta através do Algoritmo Proposto em XIA YANG, 2008

Neste primeiro passo da pesquisa utilizou-se como referência o estudo proposto por (XIA YANG, 2008) onde se realiza simulações no *software* PSCAD/EMTDC para calcular valores de tensão e corrente nos terminais de um circuito representativo de cabos subterrâneos sujeitos ou não a faltas, para através de um algoritmo, estimar o local do defeito.

No estudo de (XIA YANG,2008) é analisado um sistema trifásico, mas para o estudo proposto por esta dissertação o algoritmo foi simplificado para análise monofásica, pois segundo pesquisa junto às concessionárias nacionais, problemas relacionados a faltas monofásicas são mais representativas.

O modelo do circuito equivalente é mostrado na Figura 4.1 e apresenta duas seções, sendo a *seção p* da fonte até o ponto da falta e a *seção q* do ponto da falta até a carga. A corrente de falta flui através a resistência de falta para a terra.

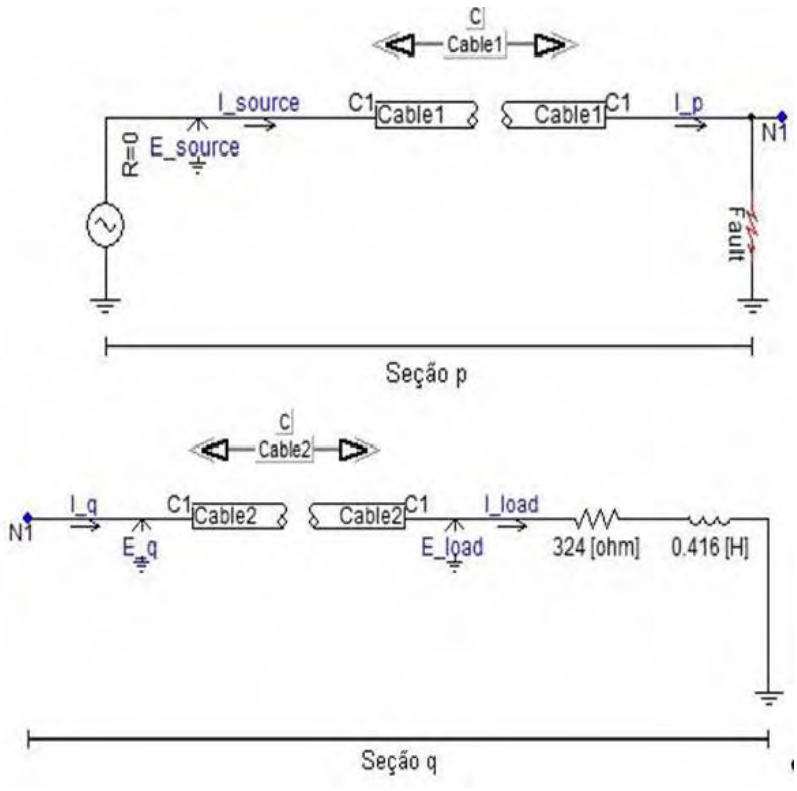


Figura 4.1 – Modelo de um Circuito Equivalente de um Cabo Subterrâneo de Seção Simples

A Figura 4.2 apresenta o cabo estudado. Os parâmetros de configuração do cabo utilizados no estudo são apresentados na Tabela 4.1. Nesta configuração, a impedância do

cabo extraída da simulação é igual *a* $(0.761928087 \times 10^{-04} + j0.811309595 \times 10^{-03})\ \Omega$ e a admitância igual a $(j0.146925120 \times 10^{-06})\ S$.

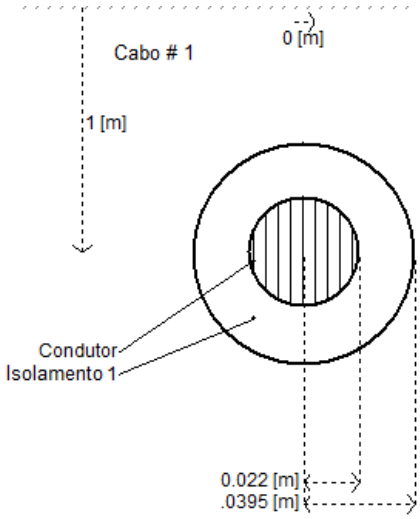


Figura 4.2 – Seção Transversal do Cabo Utilizado na Simulação

Tabela 4.1 – Parâmetros de Configuração do Cabo

Parâmetros do cabo	Valores
Resistividade do núcleo	$1{,}68 \times 10^{-8}\ \Omega.m$
Permeabilidade para o núcleo e isolamento	1,0
Permissividade para o isolamento	4,1

A estimativa da distância da falta é baseada nas medições de tensão e corrente no terminal de envio, geradas pelo *software* PSCAD/EMTDC. Com esses dados extraídos da simulação é possível criar um algoritmo em MATLAB eficiente para a localização da falta, conforme proposto por (XIA YANG, 2008).

Os passos que devem ser seguidos para se ter o local da falta, bem como o valor da resistência de falta é apresentado:

Da simulação, é possível extrair a impedância *z* e a admitância *y* do cabo e calcular a constante de propagação:

$$\gamma = \sqrt{z.y} \qquad (07)$$

A partir da Equação (07), encontra-se a constante *C*:

$$C = -\frac{y}{\gamma} \tag{08}$$

As equações que descrevem o circuito na *seção p* e na *seção q* são dadas, respectivamente, por:

$$\begin{bmatrix} V_p(x) \\ I_p(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma.x) & \sinh(\gamma.x) \\ C.\sinh(\gamma.x) & C.\cosh(\gamma.x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \tag{09}$$

$$\begin{bmatrix} V_q(y) \\ I_q(y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma.y) & \sinh(\gamma.y) \\ C.\sinh(\gamma.y) & C.\cosh(\gamma.y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ F \end{bmatrix} \tag{10}$$

Admitindo a distância da falta zero e o valor da tensão da fonte *Vfonte* igual a um valor estipulado e a corrente na fonte *Ifonte* obtida para cada caso, pode-se obter as constantes *A* e *B* através da Equação (09).

$$\begin{bmatrix} V_{fonte} \\ I_{fonte} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma.x) & \sinh(\gamma.x) \\ C.\sinh(\gamma.x) & C.\cosh(\gamma.x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \tag{11}$$

Utilizando as constantes *A* e *B* obtidas pela Equação (09), torna-se possível o cálculo de $V_p\ (d)$ e $I_p\ (d)$:

$$V_p(d) = A.\cosh(\gamma.d) + B.\sinh(\gamma.d) \tag{12}$$

$$I_p(d) = C\sinh(\gamma.d) + B.\cosh(\gamma.d) \tag{13}$$

Assumindo $y = 0$ na Equação (10), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V_q(0) \\ I_q(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(0) & \sinh(0) \\ C.\sinh(0) & C.\cosh(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ F \end{bmatrix} \tag{14}$$

Em seguida, assume-se $y = l - d$ e obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V_q(l-d) \\ I_q(l-d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh[\gamma.(l-d)] & \sinh[\gamma.(l-d)] \\ C.\sinh[\gamma.(l-d)] & C.\cosh[\gamma.(l-d)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ F \end{bmatrix} \quad (15)$$

Sabendo-se que:

$$I_q(l-d) = \frac{V_q(l-d)}{Z_{carga}} \quad (16)$$

E fazendo algumas manipulações algébricas, pode-se obter o seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} E \\ F \\ I_{q0} \\ V_q(l-d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(0) & \sinh(0) & 0 & 0 \\ C.\sinh(0) & C.\cosh(0) & -1 & 0 \\ \cosh[\gamma.(l-d)] & \sinh[\gamma.(l-d)] & 0 & -1 \\ C.\sinh[\gamma.(l-d)] & C.\cosh[\gamma.(l-d)] & 0 & -\frac{1}{Z_L} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_p(d) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Assumindo valores para *d* e *Rf*, pode-se encontrar as constantes *E*, *F* e I_q *(0)*. Inicialmente, escolheu-se *d* igual a 10 m e *Rf* igual a 1 Ω.

Da Equação (10) pode-se extrair uma expressão para o cálculo de $I_q(y)$:

$$I_q(y) = C.[E\sinh(\gamma.y) + F.\cosh(\gamma.y)] \quad (18)$$

Conhecendo a Lei dos Nós, e observando a Figura 4.3, temos que:

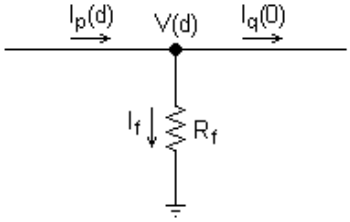


Figura 4.3 – Falta do Núcleo para a Terra

$$f(d, R_f) = V_p(d) - \left[I_p(d) - I_q(0)\right] R_f \qquad (19)$$

Onde os valores de I_q *(0)*, I_p *(0)* e V_p *(0)* são obtidos das Equações (9) e (10).

Utilizando o método de *Newton-Raphson*, pode-se dividir a Equação (19) em duas partes, real e imaginária, sendo a parte real relativa à distância da falta e a parte imaginária relativa à resistência de falta. Aplicando-se o método iterativo, obtém-se a estimativa para a distância da falta, se o resultado convergir para um mesmo valor. Caso contrário, admiti-se uma nova distância de falta para o método.

Por fim, para este primeiro passo de estudo, que tinha como objetivo estudar os parâmetros do problema, verificando se a variação dos parâmetros como comprimento do cabo, resistência de falta e local da falta influenciam no algoritmo proposto por (XIA YANG, 2008), foram propostas as seguintes simulações e etapas para se avaliar a situação:

4.1.1 Variação da Resistência de Falta

Para este estudo, foi adotado como padrão um cabo com 2,4 km de comprimento, e a falta localizada a 600 m de distância a partir do terminal de envio. A corrente de falta flui por meio da resistência de falta para a terra.

Sobre o algoritmo, a resistência de falta assume o valor de 0,1 Ω, 1 Ω e 10 Ω, sucessivamente.

Anotaram-se as tensões e correntes nos terminais de envio e recebimento extraídos das simulações e aplicou-se o algoritmo proposto por XIA YANG que foi implementado no software MATLAB, sendo possível determinar de forma aproximada o local da falta e as respectivas resistências de falta, verificando-se a influência da resistência de falta.

4.1.2 Variação da Distância da Falta

Neste segundo estudo é a distância de falta que varia, então se optou em manter constantes a resistência de falta em 0,1 Ω e o comprimento do cabo em 2,4 km.

Os valores propostos para locais de falta, com relação ao terminal de envio são: 300 m, 1200 m e 2000 m.

Anotou-se as tensões e correntes nos terminais de envio e recebimento extraídas das simulações e aplicou-se o algoritmo proposto por XIA YANG que foi implementado no software MATLAB, sendo possível determinar de forma aproximada o local da falta e as respectivas resistências de falta, verificando as diferenças para a variação do local da falta.

4.1.3 Variação do Comprimento do Cabo

Por fim, no terceiro caso a distância da falta ficou fixa em 600 m e a resistência de falta em 0,1 Ω.

Variou-se o comprimento total do cabo para: 3000 m, 3500 m e 4000 m.

Anotaram-se as tensões e correntes nos terminais de envio e recebimento extraídos das simulações e aplicou-se o algoritmo proposto por XIA YANG que foi implementado no software MATLAB, sendo possível determinar de forma aproximada o local da falta e as respectivas resistências de falta, verificando as diferenças para a variação de comprimento de cabo.

4.2 Criação de Banco de Dados: Falta Monofásica Fase-Terra, com Cabo Simples e com Resistência de Falta Fixa

Com o objetivo de se implementar uma rede neural artificial para auxiliar nesta pesquisa, é proposto nesta etapa metodológica realizar diversas simulações de um sistema monofásico, com cabo simples. A Figura 4.1 mostra o circuito e a Figura 4.2 apresenta a configuração do cabo.

Inicialmente para verificar a eficiência das redes neurais neste estudo, a resistência de falta é mantida constante em 0,1 Ω, variando-se o comprimento do cabo e o local da falta. Cada simulação fornecerá os seguintes parâmetros para o banco de dados de treinamento:

a) Entradas:
   - comprimento de cabo;
   - corrente no terminal de envio;
   - corrente no terminal de recebimento; e
   - tensão no terminal de recebimento.

b) Saída:

- local da falta com relação ao terminal de envio.

A proposta de simulações para esta segunda etapa da pesquisa é apresentada a seguir:

1) Variar o comprimento do cabo de 250 em 250 m a partir de 500 m de comprimento até 4000 m;
2) Variar o local da falta de 100 em 100 m para cada comprimento de cabo; e
3) Para cada simulação anotar a tensão no terminal de recebimento, a corrente no terminal de envio, e a corrente no terminal de recebimento.

Observação: os dados de tensão e corrente são valores RMS.

4.3 Avaliação de Redes Neurais: MLP, RBF, GRNN e PNa

Para o estudo de localização de faltas de baixa impedância em sistemas subterrâneos de distribuição de energia elétrica, é proposto nesta etapa, através do uso do banco de dados criados na etapa anterior, avaliar diferentes tipos de redes neurais existentes, como: Redes MLP - *Multi-Layer Perceptron*, Redes RBF - *Radial Basis Functions*, Redes GRNN - *General Regression NeuralNetworks* e Rede PNN - *Probabillistic Neural Networks*.

Será utilizado o banco de dados de 326 amostras, das quais 306 serão utilizadas para o treinamento de cada rede e o erro médio será calculado a partir dos dados de validação restantes, com 20 amostras.

4.4 Avaliação de Configuração das RNA

O objetivo da quarta etapa metodológica é definir a melhor configuração de rede para estudar o problema de localização de falta.

A topologia da rede é a *feedforward* multicamadas, e optou-se pelo algoritmo *Backpropagation* ou Regra Delta Generalizada para aprendizagem, pois como visto na etapa anterior obteve melhores resultados.

Neste contexto, são propostas para se avaliar a RNA, as seguintes opções de configurações:

1) Épocas de treinamento em: 200, 500, 1000 e 5000.
2) Configurações de neurônios em:
   - ✓ uma camada : 10, 20 e 30.
   - ✓ duas camadas: 4-16, 5-10; 5-15; 10-10; 10-20; 15-5 e 20-10.
3) Função de ativação em: *tansig* e *logsig*.

4.5 Avaliação da Quantidade de Dados de Treinamento para cada Tipo de Treinamento da RNA

Nesta etapa será avaliado o desempenho de cada tipo de treinamento em relação à quantidade de dados utilizados durante o treinamento da rede neural.

O banco de dados utilizado para este estudo é o de 326 amostras. Será avaliado o desempenho da RNA, variando os dados de treinamento em: 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300 e 326. O erro médio será calculado a partir dos dados restantes para a validação da rede, ou seja, respectivamente: 301, 276, 251, 226, 201, 176, 151, 126, 101, 76, 51, 26 e 1.

4.6 Obtenção do Banco de Dados Teste e Discussão dos Resultados

Para a escolha da melhor configuração de rede neural verificou-se qual o melhor tipo de treinamento através dos erros médios (Etapa 4.4) obtidos para cada configuração das RNAs simuladas e também o comportamento de cada tipo de treinamento em relação à quantidade de dados de treinamento (Etapa 4.5).

Foi criado um banco de dados para teste com 30 amostras aleatórias com intuito de avaliar o desempenho da melhor configuração de rede escolhida e também discutir os resultados obtidos por esta RNA.

4.7 Análise da Influência dos Dados de Entrada

Com o intuito de melhorar a avaliação da rede neural escolhida, novos bancos de dados de treinamento e teste podem ser criados. Nesta etapa da metodologia é proposta a seguinte alteração:

1) Retirar do bando de dados de treinamento, todas as amostras de um determinado comprimento de cabo, com intuito de avaliar a influência da variação do local de falta sobre a precisão da rede neural.
2) Retirar do banco de dados de treinamento, todas as amostras de um determinado local de falta, com intuito de avaliar a influência da variação do comprimento do cabo sobre a precisão da rede neural.

4.8 Comparação: Rede Neural X Algoritmo Proposto em XIA YANG, 2008

Para verificar a diferença de precisão entre o algoritmo e a rede neural desenvolvida, utilizou-se o comprimento do cabo de 2400 m e as distâncias de falta de 300 m, 1200 m e 2000 m, mantendo-se a resistência de falta em 0,1 Ω, comparando-se os valores de erro e também as diferenças de distâncias de estimação de local de falta..

4.9 Saída da RNA: Resistência de Falta

Para avaliar se a rede é capaz de encontrar o valor da resistência de falta, novas simulações foram feitas, variando-se a resistência de falta. Foi escolhido como padrão um cabo de 2,0 km de comprimento, e as resistências de falta ensaiadas são consideradas de baixa impedância, e caracterizam falhas mais fáceis de serem detectadas nos métodos atuais. Os valores de resistência de falta variam de 0,1 Ω até 5,0 Ω.

A configuração de rede escolhida anteriormente é a mesma que será usada para avaliar esta situação, um novo banco de dados teste é criado para avaliar-se esta proposta. Assim, o banco de dados de treinamento possui 190 dados e o banco de dados de teste foi feito com 15 amostras.

4.10 Duas Saídas: Local da Falta e Resistência de Falta

Com intuito de obter uma RNA com a capacidade de estimar tanto a localização de falta, quanto da resistência de falta, novos testes foram realizados com o banco de dados de treinamento e de testes utilizados na etapa anterior.

4.11 Avaliação do Desempenho da Variação da Quantidade de Dados de Entrada

O desempenho das RNAs depende da complexidade do problema e também da quantidade de dados de treinamento. Neste contexto, esta etapa da pesquisa busca comparar o desempenho da rede neural escolhida de acordo com diferentes combinações de dados de entrada, uma vez que, o comprimento de cabo é considerado uma variável dependente das tensões e correntes.

Nesta etapa será realizado um pequeno estudo com o banco de dados de treinamento de 458 amostras e o banco de dados de teste de 30 amostras. Serão consideradas as seguintes combinações de entrada:

1) comprimento do cabo, tensão de recebimento, corrente de envio e corrente de recebimento;

2) tensão de recebimento, corrente de envio e corrente de recebimento;

3) corrente de envio e corrente de recebimento;

5 SIMULAÇÕES COM PSCAD/EMTDC E VALIDAÇÕES DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

5.1 Estudo do Problema através do Algoritmo Proposto em XIA YANG, 2008

Com intuito de verificar a influência dos parâmetros: resistência de falta, comprimento do cabo e local da falta, no algoritmo proposto por XIA YANG, 2008, simulações foram feitas com o PSCAD/EMTDC e valores de tensão e corrente obtidos foram processados em MATLAB, para calcular o valor do local da falta e o valor da resistência de falta. A análise dos resultados é feita considerando o erro apresentado.

5.1.1 Variação de Resistência de Falta

5.1.1.1 Resistência de falta igual à 0,1 Ω.

A resistência de falta *Rf*, para este caso, vale 0,1 Ω. E a partir da simulação obteve-se a corrente na fonte igual à *(12894.79 - j43086.00) A*.

Mediante os cálculos descritos na seção 3.1 da metodologia, a estimativa da distância da falta encontrada foi de 601,38 m, apresentando um erro de 0,23 % em relação distância utilizado na simulação. E a estimativa de resistência de falta foi de 0,1002 Ω e o erro obtido foi de 0,2%.

5.1.1.2 Resistência de falta igual à 1 Ω

A resistência de falta *Rf*, para este caso, vale 1 Ω. E a partir da simulação obteve-se a corrente na fonte igual à *(17999.08 - j8431.87) A*.

Por meio dos cálculos anteriormente descritos, a estimativa da distância da falta encontrada foi de 602,89 m, apresentando um erro de 0,48 % em relação distância utilizado na simulação. E a estimativa de resistência de falta foi de 1,0003 Ω e o erro obtido foi de 0,03%.

5.1.1.3 Resistência de falta igual à 10 Ω

A resistência de falta *Rf*, para este caso, vale 10 Ω. E a partir da simulação obteve-se a corrente na fonte igual à *(2328.29 - j135.43) A*.

Mediante os cálculos descritos, a estimativa da distância da falta encontrada foi de 626,15 m, apresentando um erro de 4,36 % em relação distância utilizado na simulação. E a estimativa de resistência de falta foi de 10,003 Ω e o erro obtido foi de 0,03 %.

5.1.2 Variação do Local da Falta

5.1.2.1 Falta a 300 m do terminal de envio.

Com a distância de falta em 300 m, a estimativa da distância da falta simulada encontrada foi de 300,07 m com um erro de 0,023% e a resistência de falta foi de 0,1 Ω, ou seja, sem erros.

5.1.2.2 Falta a 1200 m do terminal de envio

Com a distância de falta em 1200 m, a estimativa da distância da falta simulada encontrada foi de 1203,17 m com um erro de 0,26% e a resistência de falta foi de 0,099 Ω, com um erro de 1%.

5.1.2.3 Falta a 2000 m do terminal de envio

Com a distância de falta em 2000 m, a estimativa da distância da falta simulada encontrada foi de 2005,8 m com um erro de 0,29% e a resistência de falta foi de 0,113 Ω, com um erro de 13%.

5.1.3 Variação do Comprimento Total do Cabo

5.1.3.1 Comprimento de 3000 m

Com o comprimento do cabo igual 3000 m, a estimativa da distância da falta simulada encontrada foi de 601,43 m com um erro de 0,24% e a resistência de falta foi de 0,1002 Ω, com um erro de 0,2%.

5.1.3.2 Comprimento de 3500 m

Com o comprimento do cabo igual 3500 m, a estimativa da distância da falta simulada encontrada foi de 601,32 m com um erro de 0,22% e a resistência de falta foi de 0,1002 Ω, com um erro de 0,2%.

5.1.3.3 Comprimento de 4000 m

Com o comprimento do cabo igual 4000 m, a estimativa da distância da falta simulada encontrada foi de 601,34 m com um erro de 0,223% e a resistência de falta foi de 0,1002 Ω, com um erro de 0,2%.

5.1.4 Resumo dos Resultados

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores das localizações de falta e os erros encontrados a partir das simulações de acordo com os casos estudados.

Tabela 5.1 – Valores de Localização de Falta e Erros Obtidos (GASTALDELLO et.al., 2011)

Resistência de Falta (Ω)	Local da Falta Real (m)	Comprimento do Cabo (m)	Local da Falta Calculado (m)	Erro (%)
0.1			601.38	0.23
1	600	2400	602.89	0.48
10			626.15	4.36
	300		300.07	0.023
0.1	1200	2400	1203.17	0.26
	2000		2005.8	0.29
		3000	601.43	0.24
0.1	600	3500	601.32	0.220
		4000	601.34	0.223

Pode-se concluir mediante a análise da Tabela 5.1 que a estimativa de localização da falta sofre maiores influências da variação da resistência de falta, quanto maior a resistência, maior é o erro. A variação de localização de falta influencia um pouco na estimativa de localização da falta, enquanto o comprimento do cabo praticamente não influencia para esta análise de estimativa de localização de falta.

5.2 Criação de Banco de Dados: Falta Monofásica Fase-Terra, com Cabo Simples e com Resistência de Falta Fixa

Com intuito de se criar um banco de dados para o desenvolvimento de redes neurais artificiais, simulações foram realizadas com o PSCAD/EMTDC, variando-se os comprimentos do cabo e os locais da falta. A princípio a resistência de falta foi mantida constante em 0,1 Ω.

A Figura 5.1 a seguir mostra o circuito utilizado nas simulações com o PSCAD/EMTDC.

O banco é composto de 326 dados, que serviram para treinar as diversas configurações de rede neural artificial.

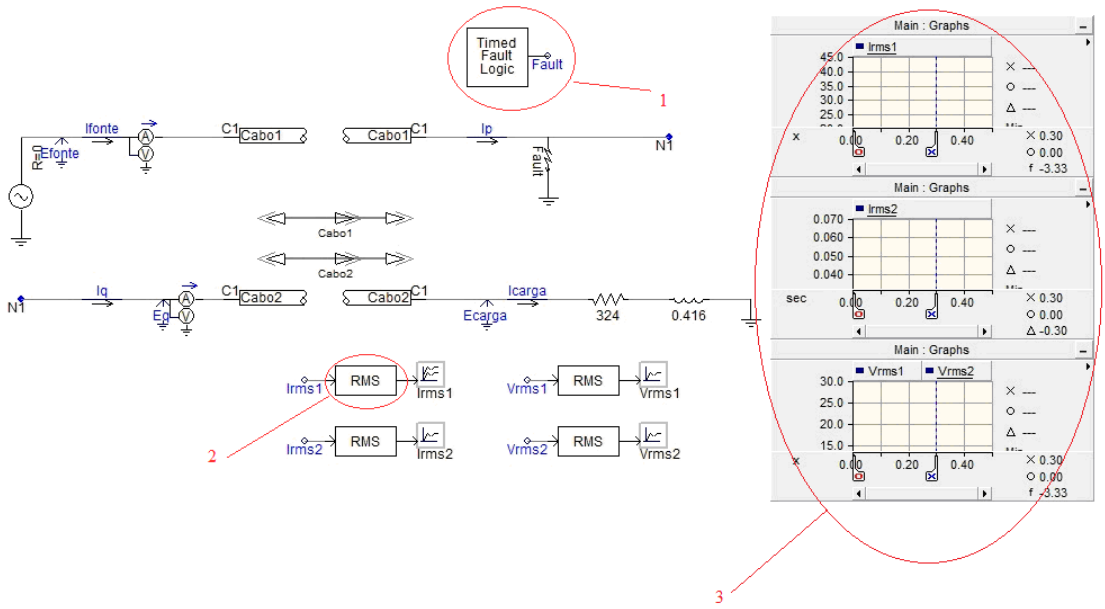


Figura 5.1 – Circuito Simulado para Levantamento de Dados

Na Figura 5.1 o número 1 é o bloco de controle da falta, nele pode-se configurar o tempo da falta, o valor da impedância de falta, e a duração da falta. Já o número 2 é o bloco da função RMS do sinal, neste bloco pode-se configurar como será feita a filtragem e o cálculo do valor RMS. Já o número 3 é a janela do resultado RMS do valor medido.

As Figuras 5.2 e 5.3 mostram janelas de configurações do PSCAD/EMTDC.

Figura 5.2 – Configuração da Falta

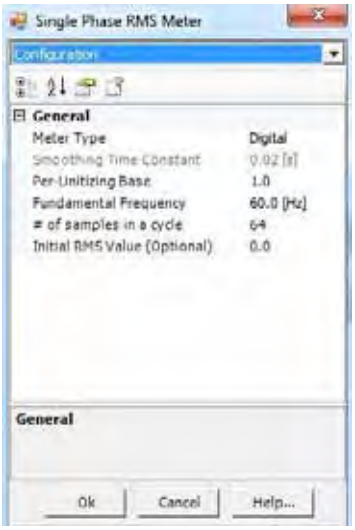


Figura 5.3 – Configuração do Medidor de Valores RMS

O PSCAD/EMTDC mostra diferentes tipos de gráfico, neste caso, a simulação foi montada somente para apresentar o valor RMS dos sinais de corrente, e tensão. Este tipo de gráfico que mostra a forma de onda para os valores RMS da tensão e corrente pode ser visualizado a seguir na Figura 5.4.

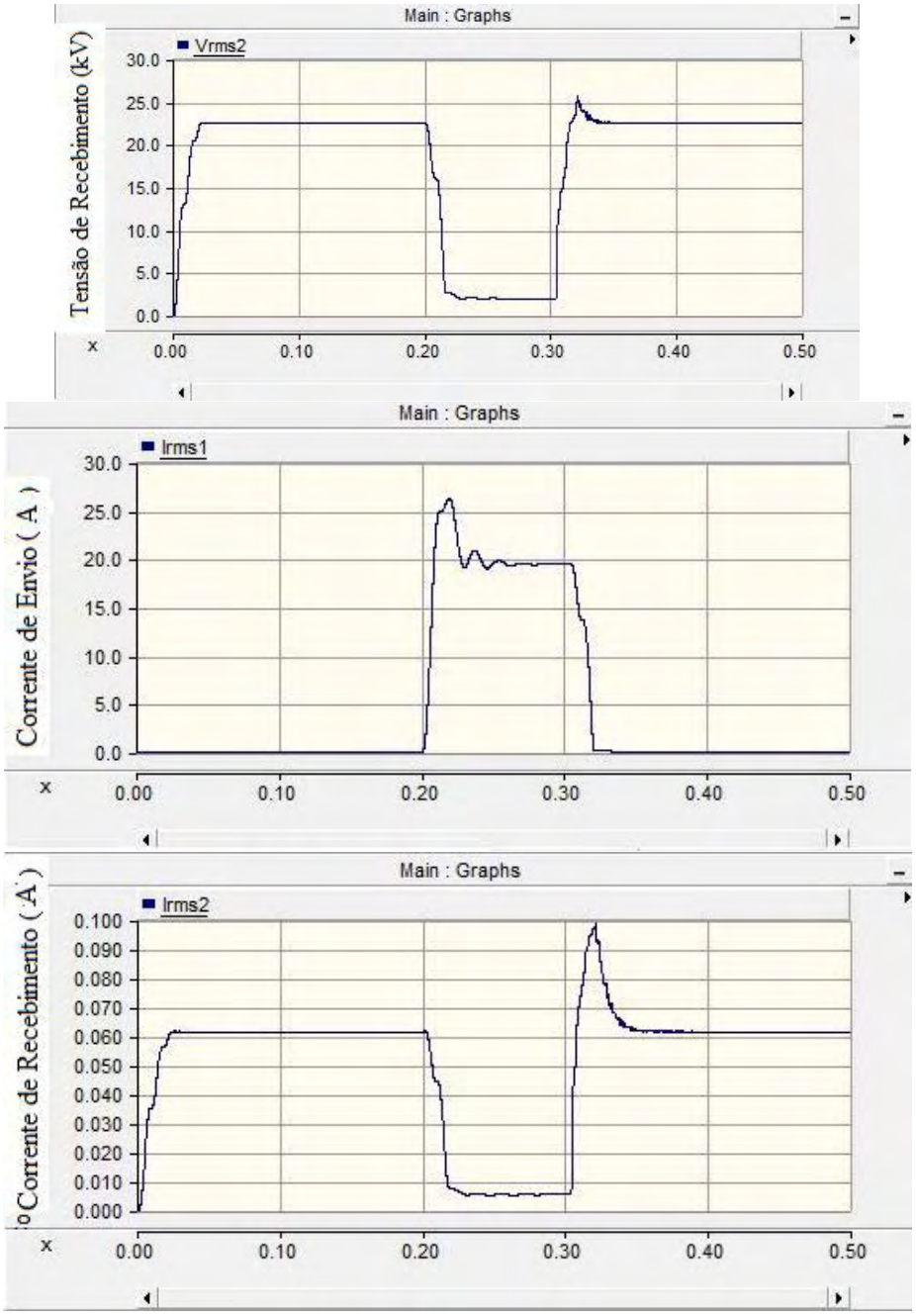


Figura 5.4 – Gráfico da Forma de Onda RMS

Alguns valores do banco de dados de 326 amostras são mostrados a seguir na Tabela 5.2.

Os dados armazenados neste banco de dados são:

- Comprimento do cabo (escolhido);
- Tensão de recebimento em kV (medido no software);
- Corrente de envio em A (medido no software);

- Corrente de recebimento em A (medido no software); e
- Local da Falta em metros (escolhido).

Tabela 5.2 – Alguns Valores do Banco de Dados de 326 Amostras

Comprimento do cabo (m)	Tensão de Recebimento (kV)	Corrente de Envio (A)	Corrente de Recebimento (A)	Local da Falta (m)
500	12,726248	127,294051	0,035018	100
500	11,285784	112,885777	0,031128	200
750	8,235749	82,377631	0,022635	300
750	6,418809	64,203520	0,017683	400
1.000	3,816486	38,208462	0,010527	700
1.000	3,346506	33,552481	0,009284	800
2.000	4,417634	44,186408	0,011883	600
2.500	1,306233	12,999610	0,003577	2.100
2.500	1,243808	12,416432	0,003422	2.200
4.000	0,760742	7,657876	0,002092	3.600
4.000	0,737007	7,403552	0,002053	3.700

5.2.1 Resumo dos Resultados

Com a conclusão desta etapa se tem um banco de dados com 326 amostras que serão utilizadas para o treinamento de diversos tipos de redes neurais e de diversas configurações de rede neural para se determinar a melhor configuração para o estudo de localização de faltas em sistema de energia subterrânea. Este banco de dados foi criado através de simulações no PSCAD/EMTDC e possui dados de comprimento de cabo, local de falta, tensão de recebimento, corrente de envio e corrente de recebimento, compreendidos na faixa de 500 m até 4000 m de comprimento de cabo, com locais de falta variando de 100 em 100 m para cada comprimento de cabo.

5.3 Avaliação de Redes Neurais: MLP, RBF, GRNN e PNN

Os testes com as redes MLP, RBF, GRNN e PNN foram realizados a partir do banco de dados com 326 amostras, dos quais 306 foram utilizados para o treinamento de cada rede e o restante (20 amostras) foi utilizado para o cálculo do erro de cada rede. A Figura 5.5 apresenta o gráfico dos erros atingidos de cada rede neural ensaiada, e a Figura 5.6 apresenta um gráfico de barras do erro médio de cada uma destas redes.

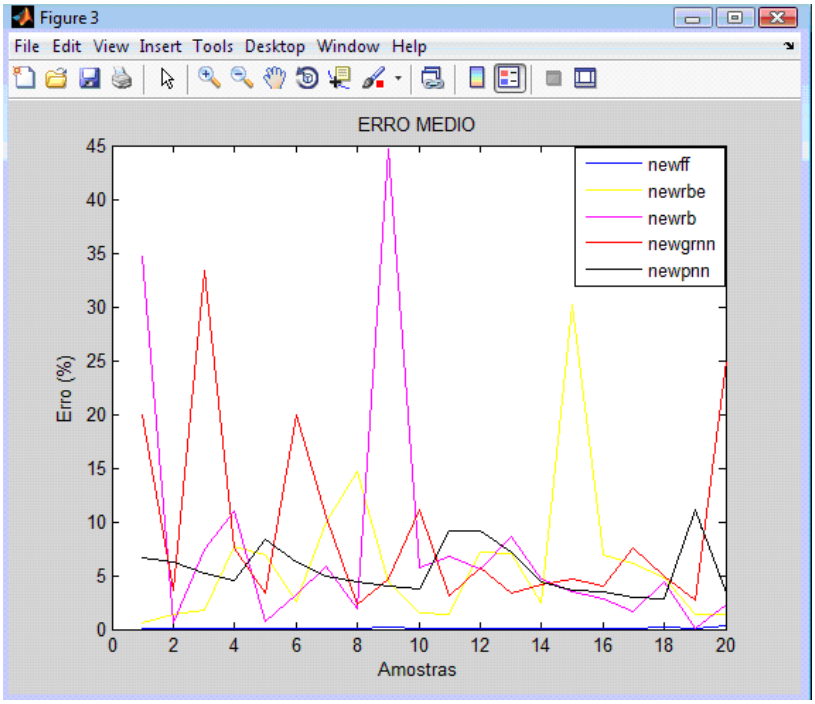


Figura 5.5 – Gráfico do Erro das Amostras para cada Rede Neural Ensaiada

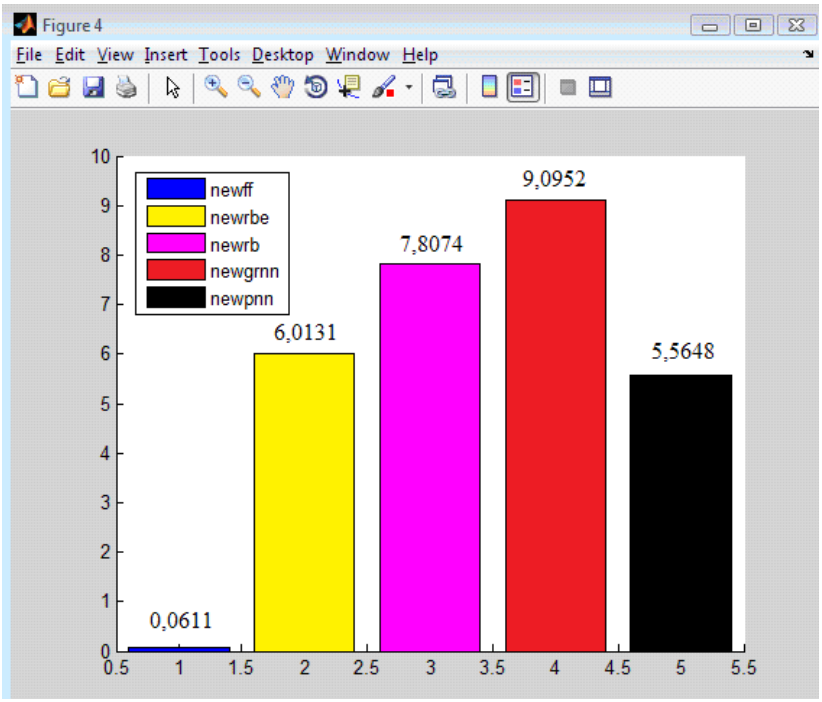


Figura 5.6 – Gráfico de Barras do Erro Médio de cada Rede Neural Ensaiada

5.3.1 Resumo do Resultados

Através da análise dos gráficos, justifica-se um estudo mais aprofundado do problema utilizando a Rede Neural MLP, pois possui uma média de erros abaixo das demais redes neurais ensaiadas.

5.4 Avaliação de Configuração das RNA

De acordo com as diferentes configurações descritas na Etapa 4.4, foram criadas mais de 50 tabelas com erros médios de cada configuração.

A Tabela 5.3 apresenta uma média destas mais de 50 tabelas criadas, apresentando qual o melhor tipo de treinamento para o estudo do problema de localização de falta.

Tabela 5.3 – Erro Médio para Cada Tipo de Treinamento de Rede

Tipo de Treinamento	Erro Médio (%)
gdx	21,35
gda	23,47
cgf	9,24
cgp	8,56
cgb	7,05
scg	7,84
bfg	14,54
oss	10,86
lm	6,51
rp	9,74

5.4.1 Resumo dos Resultados

Com a análise da Tabela 5.3, observa-se uma proximidade de erros médios de alguns tipos de treinamento, assim sendo, os seis tipos de treinamento com menores erros médios foram novamente avaliados através da variação da quantidade de dados utilizados no treinamento da rede neural.

5.5 Avaliação da Quantidade de Dados de Treinamento para cada Tipo de Treinamento da RNA

Como descrito na Etapa 4.5, os tipos de treinamento também foram avaliados de acordo com a quantidade de amostras de treinamento. A Figura 5.7 apresenta o gráfico dos erros apresentados em cada tipo de treinamento para a variação da quantidade de erros de treinamento, e a Figura 5.8 apresenta um gráfico de barras do erro médio de cada tipo de treinamento.

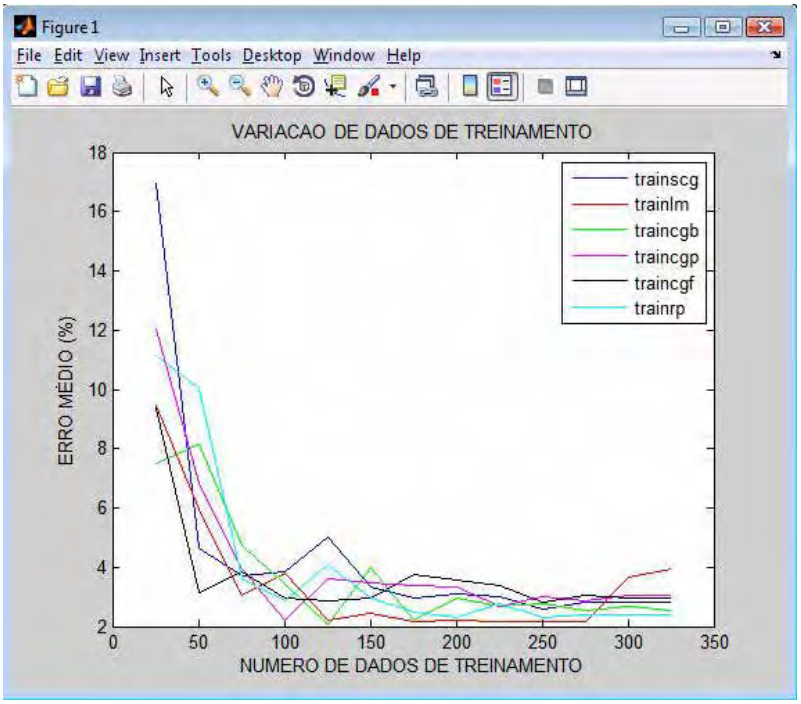


Figura 5.7 – Gráfico de Erros de cada Tipo de Treinamento Variando a Quantidade de Dados de Treinamento

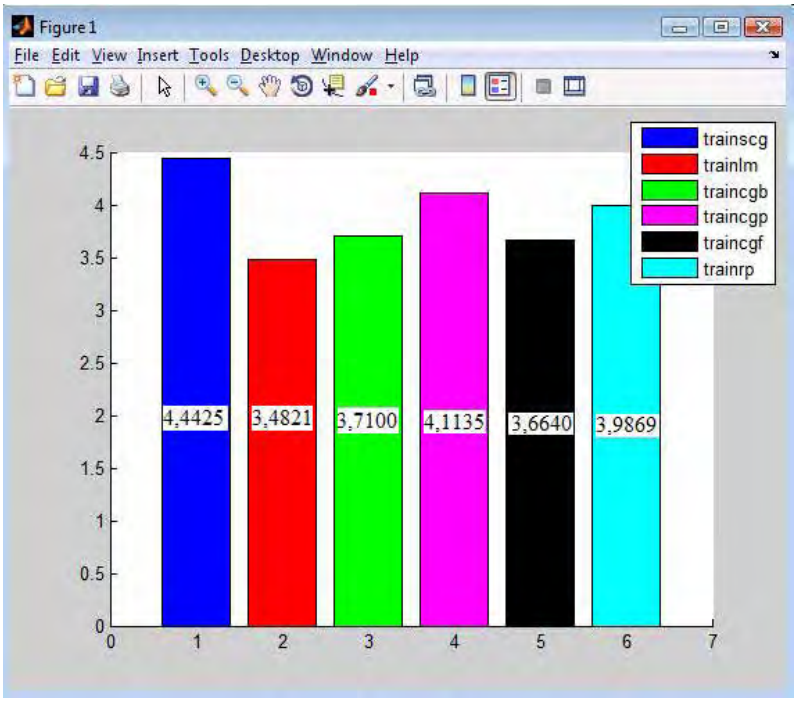


Figura 5.8 – Gráfico de Barras do Erro Médio de cada Tipo de Treinamento Variando a Quantidade de Dados de Treinamento

5.5.1 Resumo dos Resultados

Observando as figuras anteriores, o treinamento *Levenberg Marquardt* (lm) foi o escolhido para a continuidade dos estudos desta dissertação.

5.6 Escolha da Melhor Rede Simulada e Discussão dos Resultados

De acordo com os dados apresentados nas Etapas 5.4 e 5.5, a rede escolhida para a continuidade deste estudo é destacada a seguir:

- Rede Perceptron Multi-camadas (*feedforward*);
- Treinamento: *Levenberg Marquardt* (*trainlm*);
- Duas camadas intermediárias com 5 neurônios na 1ª camada e 15 neurônios na 2ª camada com funções de ativação tangente sigmoidal;
- 326 dados de treinamento e validação (90% treinamento e 10% validação);

- MSE - A média de desempenho da função erro médio quadrado normalizado (10^{-5});
- 5000 épocas.

O treinamento *Levenberg Marquargt* utiliza como método de aproximação do mínimo da função erro como o método de Newton, aplicando uma pequena modificação do método de Gauss-Newton ao introduzir um parâmetro μ, que funciona como um fator de estabilização do treinamento, ajustando a aproximação de forma a utilizar a rápida convergência do método de Newton e evitando passos muito grandes que possam levar a um erro de convergência (HAGAN, 1994).

A Figura 5.9 mostra a rede implementada.

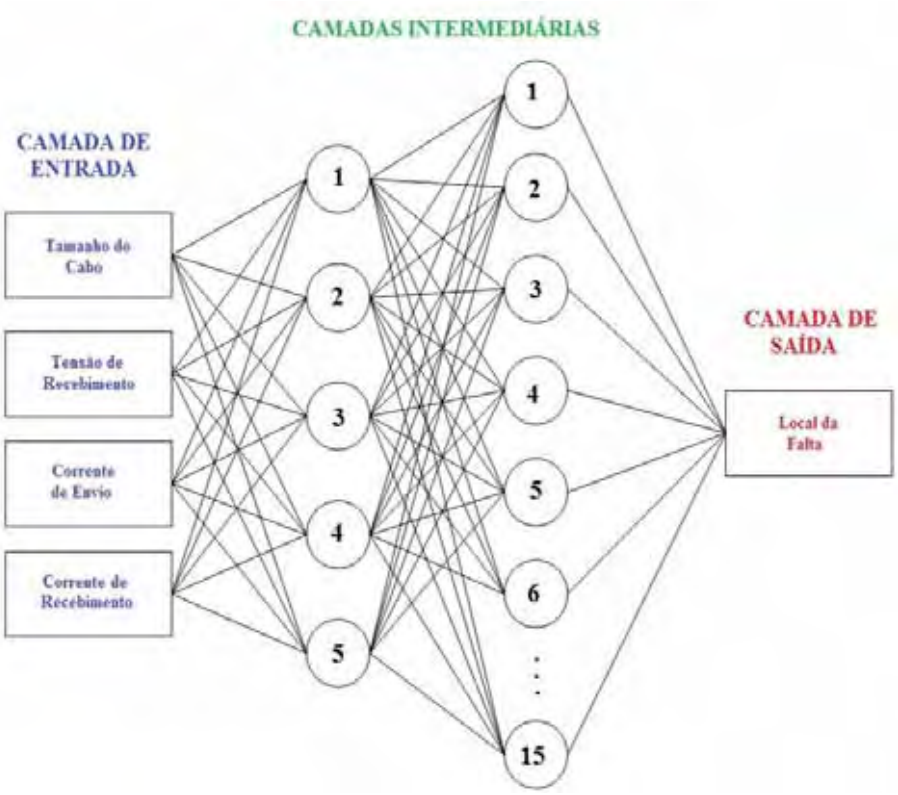


Figura 5.9 – Arquitetura Neural Implementada com uma Saída

Foi criado um banco de dados teste com 30 amostras distintas, escolhidas aleatoriamente. Este banco de dados é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Banco de Dados com 30 Amostras para Teste

Tamanho do Cabo (m)	Local da Falta (m)	Tensão do Terminal Receptor (kV)	Corrente de Envio (A)	Corrente do Terminal Receptor (A)
600	427	6,0527306	60,5417769	0,0167452
1350	825	3,2588523	32,5953380	0,0089399
1700	587	4,5101221	45,1112157	0,0122100
1950	313	7,9474408	79,4937492	0,0212744
2112	400	6,4188449	64,2038089	0,0171559
2222	744	3,5996660	36,0034327	0,0096681
2330	2085	1,3127849	13,1127499	0,0036185
2607	1053	2,5713194	25,7179018	0,0068932
2856	2100	1,3028206	13,0348639	0,0035555
3475	2641	1,0386699	10,3849696	0,0028276
3683	743	3,6043299	36,0510748	0,0094048
3825	2876	0,9527495	9,5421359	0,0025857
600	98	12,7329359	127,3609397	0,0349536
700	105	12,7095715	127,1272328	0,0348143
900	541	4,8689103	48,7004180	0,0134138
1100	655	4,0656237	40,6653516	0,0111757
4300	343	7,3490956	73,5087017	0,0188539
300	80	18,0774199	180,8193139	0,0499559
800	175	12,3660223	123,6908798	0,0338498
800	150	12,5596768	125,6279097	0,0343600
800	350	7,2212890	72,2304028	0,0198475
800	450	5,7712225	57,7259475	0,0158993
800	650	4,0952813	40,9632024	0,0113301
800	750	3,5720423	35,7281535	0,0099111
1800	250	9,5484790	95,5082386	0,0256067
1800	550	4,7944054	47,9549828	0,0129408
1800	900	2,9956920	29,9613923	0,0081478
1800	1250	2,1736829	21,7402287	0,0059575
1800	1550	1,7583994	17,5920656	0,0048554
1800	210	10,8967357	108,9942377	0,0291982

A rede neural então foi treinada e validada com o banco de dados com 326 amostras e testada com o banco de dados de teste com 30 amostras.

Apresentou um bom resultado para a maioria dos dados de teste, porém alguns resultados apresentaram erros grandes quando comparados com os demais.

Os dados do teste são apresentados na Tabela 5.5 e os dados a serem discutidos são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.5 – Banco de Dados Teste

Tamanho do Cabo (m)	Local da Falta (m)	Estimativa da Rede (m)	Diferença (m)	Erro (%)
600	427	426,5569	0,4431	0,1037
1350	825	824,8480	0,1519	0,0184
1700	587	587,1073	-0,1072	0,0182
1950	313	312,9307	0,0693	0,0221
2112	400	399,4206	0,5793	0,1448
2222	744	744,0334	-0,0334	0,0044
2330	2085	2085,5330	-0,5329	0,0255
2607	1053	1052,9850	0,01536	0,0014
2856	2100	2099,2170	0,7831	0,0372
3475	2641	2638,6770	2,3230	0,0879
3683	743	743,2142	-0,2142	0,0288
3825	2876	2879,9390	-3,9388	0,1369
600	98	100,5668	-2,5668	2,6192
700	105	100,6528	4,3472	4,1402
900	541	540,8222	0,1777	0,0328
1100	655	654,8389	0,1611	0,0245
4300	343	340,4949	2,5051	0,7304
300	80	100,0186	-20,0186	25,0232
800	175	104,1581	70,8418	40,4810
800	150	101,4443	48,5557	32,3705
800	350	349,4970	0,5030	0,1437
800	450	449,6682	0,3317	0,0737
800	650	649,7692	0,2308	0,0355
800	750	749,6830	0,3170	0,0422
1800	250	261,3885	-11,3885	4,5553
1800	550	550,1315	-0,1315	0,0239
1800	900	899,9627	0,0373	0,0041
1800	1250	1250,0680	-0,0676	0,0054
1800	1550	1549,5890	0,4114	0,0265
1800	210	227,0287	-17,0287	8,1089

Tabela 5.6 – Dados para Avaliação com Banco de 326 Amostras

Tamanho do Cabo (m)	Local da Falta (m)	Estimativa da Rede (m)	Diferença (m)	Erro (%)
4300	343	340,4949	2,5051	0,7304
300	80	100,0186	-20,0186	25,0232
800	175	104,1581	70,8418	40,4811
800	150	101,4443	48,5557	32,3705

Mesmo com alguns erros altos, destacados na Tabela 5.5, o erro médio das 30 amostras do banco de dados de teste foi de 4,325% (GASTALDELLO et.al., 2012).

A Tabela 5.6 tem dois valores de comprimento de cabo que não faziam parte do conjunto de tamanho de cabos de treinamento e validação, pois as redes MLP são capazes de aprender o problema e estimar o resultado fora dos dados de treinamento, porém o cabo de 4300 m teve um ótimo resultado e o de 300 m não, isto porque, neste banco de dados existem muito mais dados com comprimentos próximos de cabo de 4300 m do que 300 m.

O cabo de 800 m teve um erro muito alto quando analisado com falta na faixa de 150 a 200 m. A princípio imaginou-se que poderia haver algum problema com o cabo de 800 m, mas isso foi descartado ao testar outros comprimentos de cabos para esta faixa de localização de falta.

Para mostrar este problema nesta faixa de localização de falta (de 150 a 200 m), é apresentado na Figura 5.10 dois gráficos do comportamento da tensão de recebimento para os cabos com comprimentos de 800 m e na Figura 5.11 dois gráficos do comportamento da tensão de recebimento para os cabos com comprimento de 1000 m, considerando em a) as simulações variando-se o local da falta de 100 em 100 m e em b) considerando alguns pontos na faixa problema (entre 150 e 200 m).

Observa-se nas Figuras 5.10 e 5.11 que na região entre 150 a 200 m há uma não-linearidade (no gráfico b) das duas figuras. A solução encontrada para este problema foi aumentar o banco de dados de treinamento e validação, considerando a faixa de local da falta de 150 a 200 m para todos os comprimentos de cabo, assim o banco de dados passou de 326 amostras para 458 amostras e o erro médio da rede passou de 4,325% para 1,13%. A Tabela 5.7 apresenta os mesmos dados avaliados na Tabela 5.6, só que para o banco de dados com 458 amostras.

Tabela 5.7 – Dados para Avaliação com Banco de 458 Amostras

Tamanho do Cabo (m)	Local da Falta (m)	Estimativa da Rede (m)	Diferença (m)	Erro (%)
4300	343	343,1923	-0,1923	0,0561
300	80	100,0000	-20,000	25,0000
800	175	174,9543	0,0457	0,0261
800	150	150,0455	-0,0455	0,0303

Ao se comparar os resultados das Tabelas 5.6 e 5.7 há uma diminuição do erro para o local da falta de 175 m (de 40, 48% para 0,026% e de 32,37% para 0,030%), porém o cabo de 300 m o erro continua em 25%. O aumento dos dados de treinamento melhora bastante o rendimento da rede, mas dados fora da região estudada com poucos dados de treinamento, ainda apresentam resultados ruins.

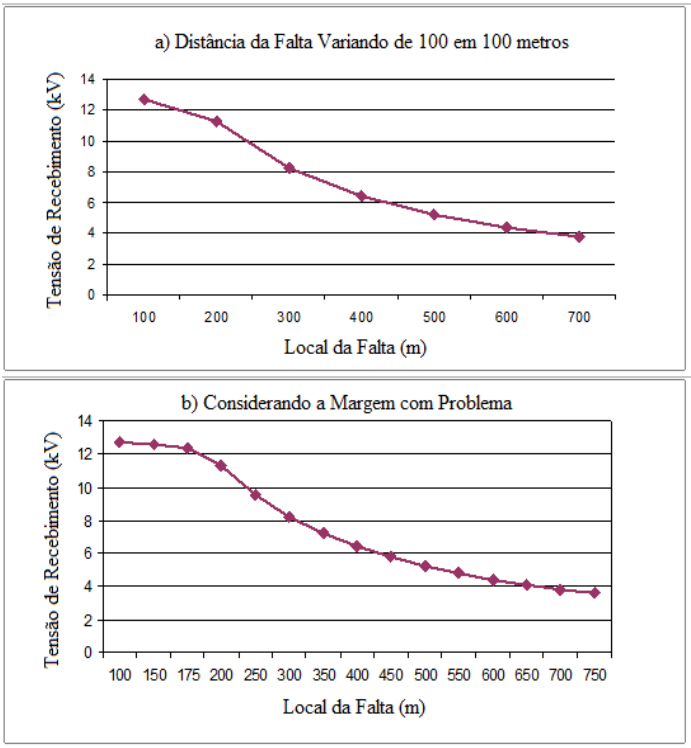


Figura 5.10 – Avaliação do Cabo de 800 m

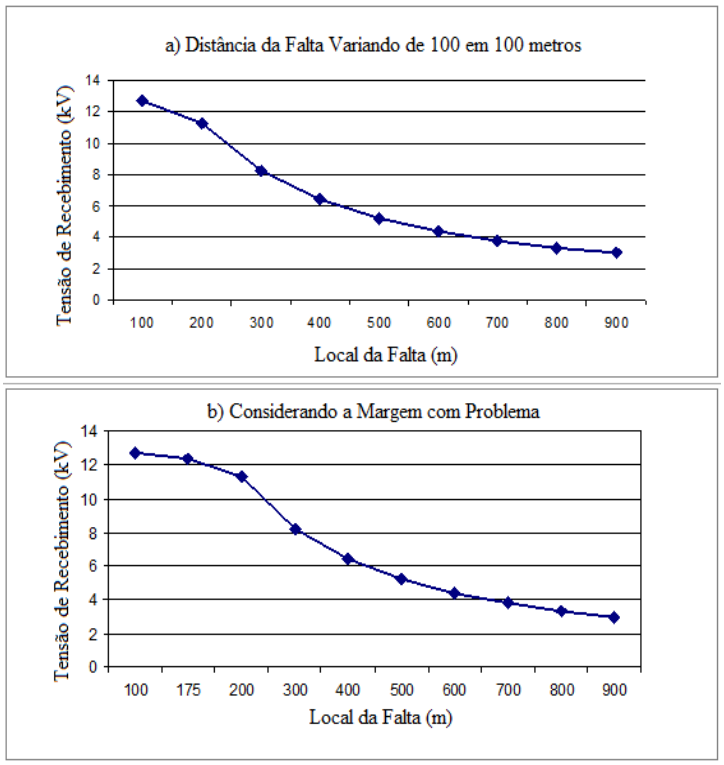


Figura 5.11 – Avaliação do Cabo de 1000 m

5.6.1 Resumo dos Resultados

Ao testar a configuração de rede escolhida ficou comprovada a necessidade de se aumentar o número de dados de treinamento, principalmente na faixa de 175 m, que conforme mostrado nas Figuras 5.10 e 5.11 apresentam uma certa não linearidade nesta região. Com o aumento do banco de dados de treinamento para 458 amostras o erro médio alcançado pelas redes para o banco de dados de treinamento passou a ser menor, porém o erro para o cabo de comprimento fora da faixa de dados (300 m) continuou alto, devido ao baixo número de amostras próximos da região. Cabe salientar que a maior distância de erro de local da falta foi de 17,0287 metros para o banco de dados de treinamento com 326 amostras e de menos de 5 metros para o banco de dados de treinamento com 458 amostras, desconsiderando o dado de 300 metros. Isto significa uma grande economia para as empresas de energia durante a manutenção, uma vez que elas vêm trabalhando com erros de 20 à 30 metros.

5.7 Análise da Influência dos Dados de Entrada

Para continuar a avaliação da rede neural escolhida, novos testes com novos bancos de testes são realizados.

Com intuito de se avaliar a influência da variação do local da falta, primeiramente foram escolhidos os comprimentos de cabo 1000 m, 1500 m, 2000 m, e 3000 m. As amostras destes comprimentos de cabo saíram do banco de treinamento e passaram a ser amostras de teste.

Os gráficos a seguir mostram os erros encontrados para cada amostra do banco de dados teste para cada situação.

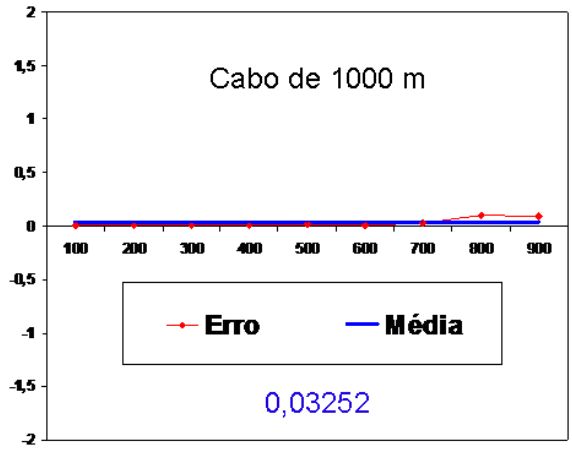


Figura 5.12 – Erros para o Cabo de 1000 m

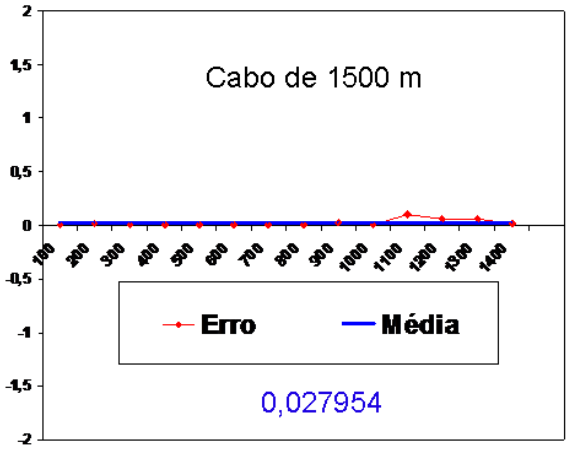


Figura 5.13 – Erros para o Cabo de 1500 m

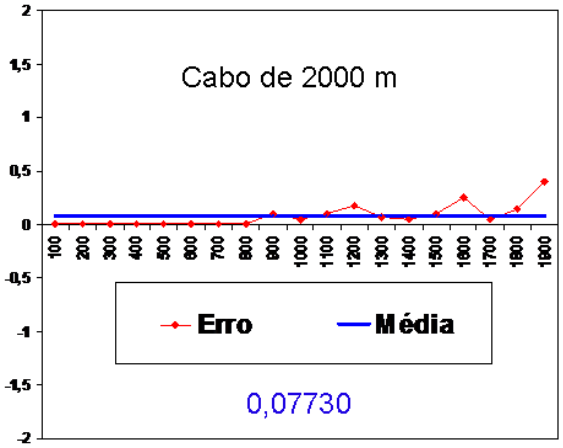


Figura 5.14 – Erros para o Cabo de 2000 m

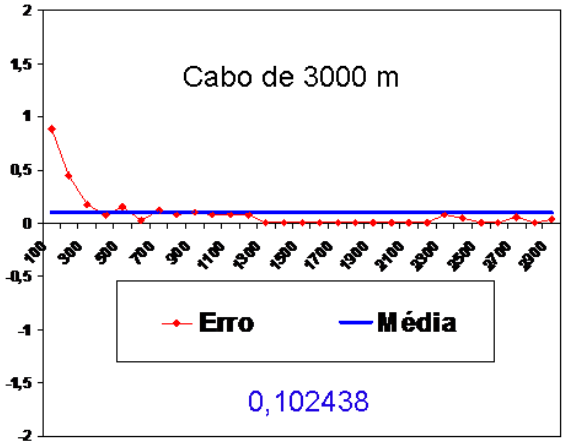


Figura 5.15 – Erros para o Cabo de 3000 m

Pelos resultados apresentados, a variação do local da falta não influência o aprendizado da rede neural estudada, pois os erros estão todos na faixa de 0 a 1%.

Para avaliar a influência do comprimento do cabo, foi escolhida a seguinte distância de falta: 400 m, 800 m, 1400 m e 2100 m. As amostras de cada comprimento de cabo com valores desta distância de falta foram retiradas do banco de dados de treinamento e passaram a ser amostras de teste.

Os gráficos a seguir mostram os erros encontrados para cada amostra do banco de dados teste para cada situação.

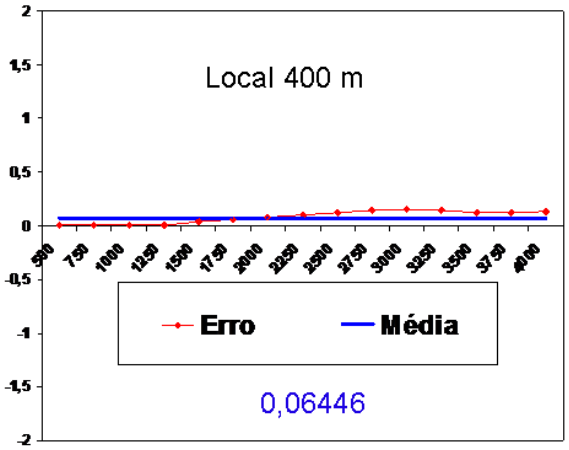


Figura 5.16 – Erros para Local de Falta em 400 m

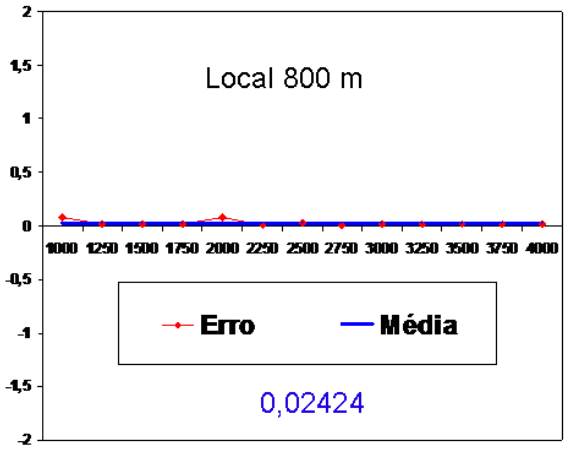


Figura 5.17 – Erros para Local de Falta em 800 m

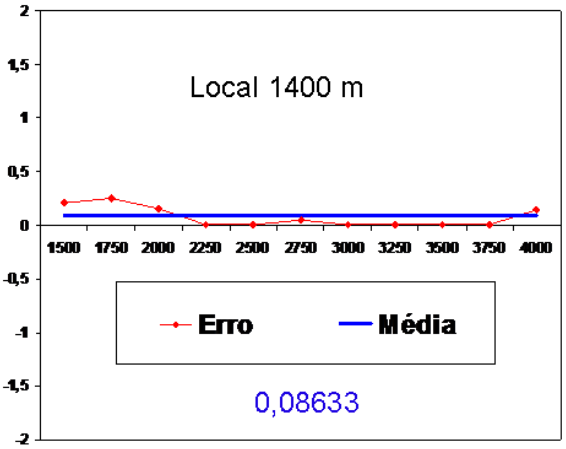


Figura 5.18 – Erros para Local de Falta em 1400 m

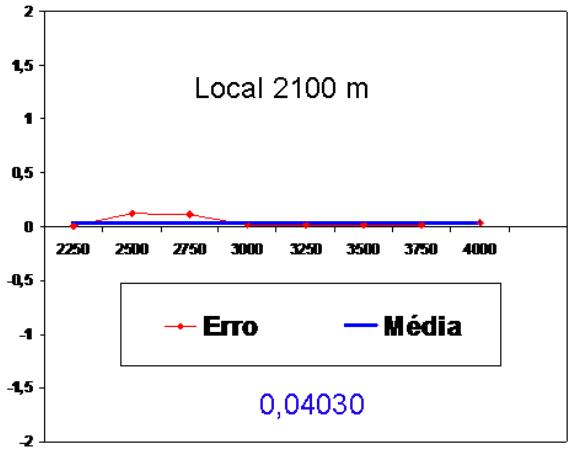


Figura 5.19 – Erros para Local de Falta em 2100 m

É Possível observar pelos gráficos anteriores, que as RNAs também não sofrem influência da variação de comprimento do cabo, pois os erros estão na faixa de 0 a 0,5%.

5.7.1 Resumo dos Resultados

Os resultados desta etapa da pesquisa foram muito satisfatórios, pois foi possível se verificar que as RNAs não sofrem influência da variação do comprimento do cabo, ou do local da falta, os erros médios dependem mais do número de amostras de treinamento.

5.8 Comparação: Rede Neural X Algoritmo Proposto em XIA YANG, 2008

Nesta etapa, o objetivo era comparar os resultados obtidos pelo o algoritmo e os resultados obtidos pela rede neural artificial desenvolvida. A Tabela 5.8 a seguir mostra os resultados do algoritmo e também da RNA.

Tabela 5.8 – Comparação Algoritmo e RNA para Local da Falta

Comprimento do Cabo (m)	Local da Falta Real (m)	Local da Falta pelo Algoritmo (m)	Erro Algoritmo (%)	Local da Falta pela RNA	Erro RNA(%)
2400	300	300,07	0,023	300,0078	0,0026
2400	1200	1203,17	0,26	1199,9003	0,0083
2400	2000	2005,8	0,29	1999,7030	0,015

Observa-se que a RNA apresentou melhores resultados em relação aos ensaios feitos com o algoritmo.

5.8.1 Resumo dos Resultados

Apesar de ter sido comparado poucos valores, as RNAs apresentaram melhores resultados do que o algoritmo proposto por (XIA TANG, 2008), o que motiva a continuação do estudo da aplicação das ferramentas inteligentes para análise do problema de localização de falta em sistemas subterrâneos.

5.9 Saída da RNA: Resistência de Falta

Devido ao desconhecimento do local exato da falta, não é possível medir a resistência de falta. Neste contexto, esta etapa estuda a possibilidade de se ensinar uma RNA a estimar a resistência de falta a partir de medidas de tensão e corrente no cabo danificado.

A rede neural implementada foi treinada com 190 dados de cabos de 2000 m com diferentes locais de falta, e diferentes resistências de falta. Criou-se um banco de dados com 15 amostras com diferentes resistências de falta e com diferentes locais de falta, mantendo-se constante o comprimento do cabo de 2000 m. A Tabela 5.9 apresenta os resultados.

Tabela 5.9 – Resultado da RNA para Resistência de Falta

Tamanho do Cabo (m)	Local da Falta (m)	Resistência de Falta (Ω)	Resistência de Falta da RNA (Ω)	Erro (%)
2000	300	0,4	0,3951458769	1,213531
2000	700	0,4	0,3850531603	3,73671
2000	1200	0,4	0,3952718584	1,182035
2000	500	0,8	0,7980626877	0,242164
2000	1000	0,8	0,7986055742	0,174303
2000	1500	0,8	0,7992518341	0,093521
2000	200	1,2	1,2176588338	1,471569
2000	400	1,2	1,2161160087	1,343001
2000	1700	1,2	1,2043178185	0,359818
2000	1000	2	1,9305992157	3,470039
2000	1300	2	1,9447523176	2,762384
2000	1900	2	1,9688476711	1,557616
2000	700	3,5	3,3141063489	5,311247
2000	1100	3,5	3,3329947327	4,771579
2000	1400	3,5	3,3493763278	4,303533

Os resultados apresentados neste estudo podem ser considerados satisfatórios, uma vez que o banco de dados utilizado para este estudo não foi muito grande. Com erro máximo de 5,3% e mínimo de 0,093%, a RNA teve uma média de 2,285% de erro para estimação do valor da resistência de falta.

5.9.1 Resumo dos Resultados

Os resultados apresentados nesta etapa da pesquisa são muito promissores, apesar do baixo número de dados de treinamento a rede obteve um erro médio de 2,285%, o aumento do banco de dados de treinamento possivelmente melhorará o desempenho da RNA.

5.10 Duas Saídas: Local da Falta e Resistência de Falta

Como continuidade da pesquisa, esta etapa avalia a eficiência da RNA quando exigido dela duas respostas na saída, a localização da falta e também a resistência de falta. Devido a uma maior complexidade para relacionar os dados de entrada com os dados de saída, a configuração da rede foi alterada para 20 neurônios na 1ª camada intermediária e 10 neurônios para a 2ª camada intermediária, as outras configurações foram mantidas.

A seguir a Figura 5.20 que representa esta rede, as Figuras 5.21 e 5.22 apresentam as respostas do software MATLAB para localização da falta e valor de resistência de falta, respectivamente. A Figura 5.23 apresenta o gráfico *Regression* e a Tabela 5.10 apresenta os erros desta simulação.

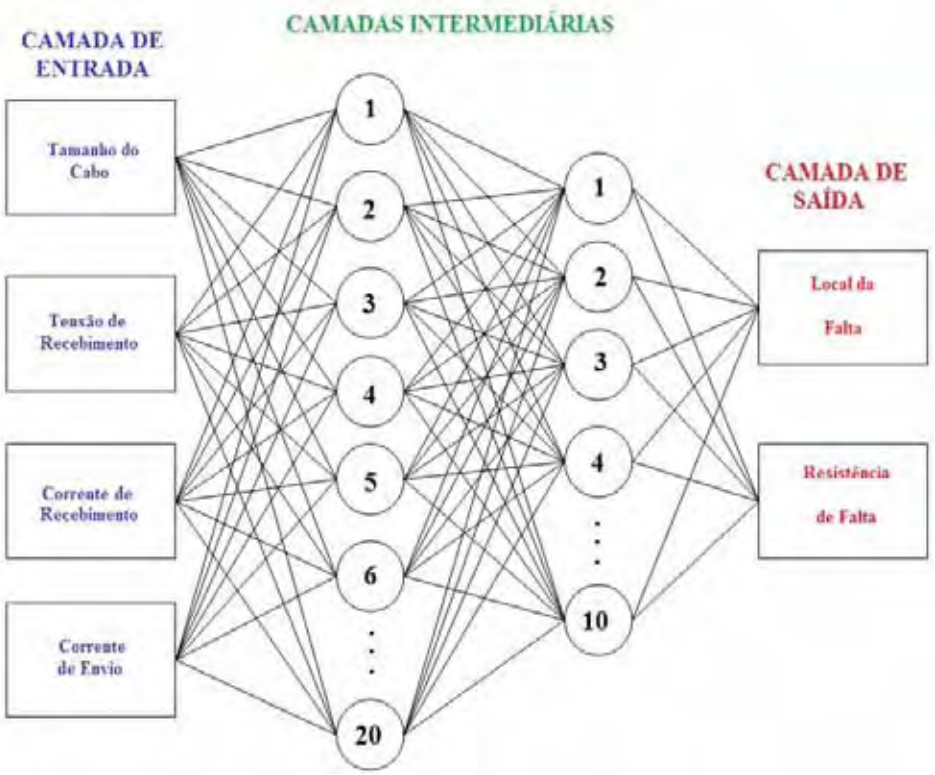


Figura 5.20 – Nova Arquitetura Neural Implementada com duas Saídas

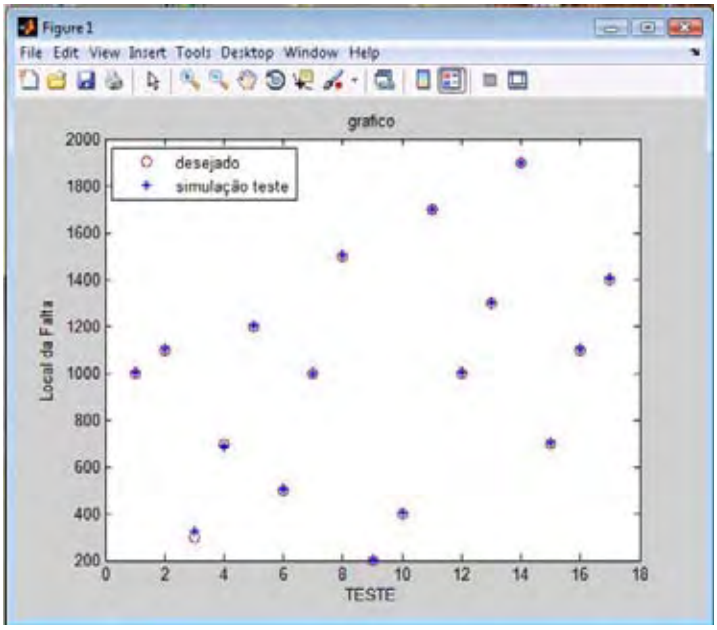


Figura 5.21 – Resultados da Rede para Local da Falta

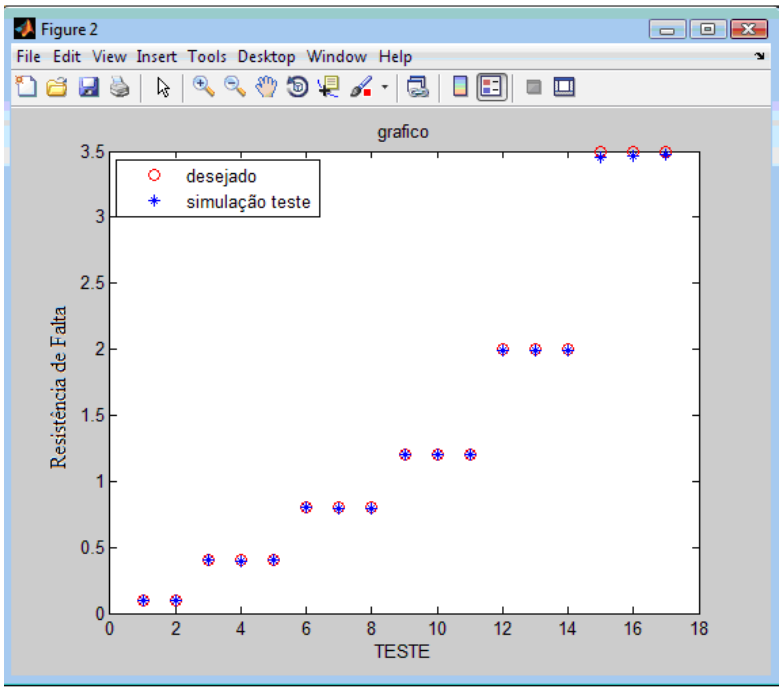


Figura 5.22 – Resultados da Rede para Resistência de Falta

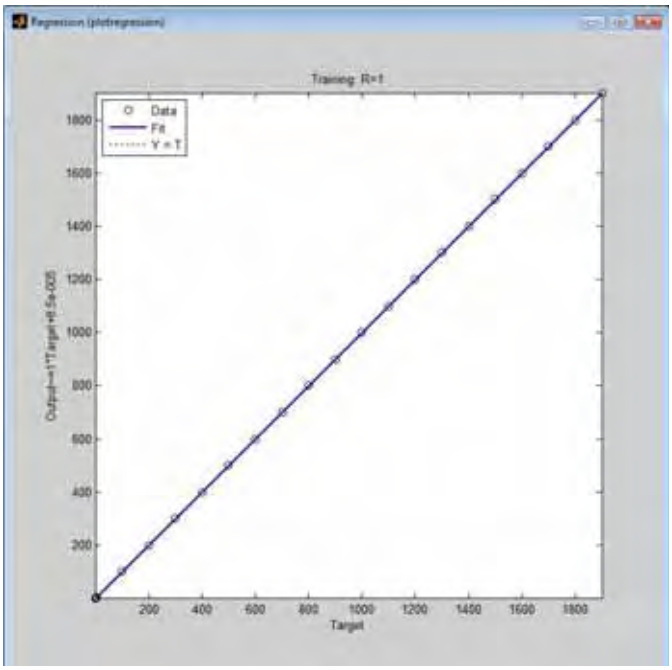


Figura 5.23 – Gráfico da Regressão da Rede

Tabela 5.10 – Resultados da RNA Completa Implementada

Tamanho do Cabo (m)	Local da Falta (m)	Resistência de Falta (Ω)	Local da Falta da RNA (Ω)	Resistência de Falta da RNA (Ω)	Erro Local (%)	Erro Resistência (%)
2000	300	0,4	295,5041	0,3887	1,4987	2,8211
2000	700	0,4	695,5126	0,3888	0,6411	2,7899
2000	1200	0,4	1198,6459	0,4186	0,1128	4,6603
2000	500	0,8	500,0113	0,8022	0,0023	0,2749
2000	1000	0,8	1000,0181	0,8078	0,0018	0,9724
2000	1500	0,8	1499,9351	0,7861	0,0043	1,7413
2000	200	1,2	200,0027	1,2004	0,0014	0,0326
2000	400	1,2	400,1008	1,1987	0,0252	0,1089
2000	1700	1,2	1700,0655	1,2038	0,0039	0,3137
2000	1000	2	999,8658	2,0027	0,0134	0,1354
2000	1300	2	1300,1019	2,0096	0,0078	0,4788
2000	1900	2	1899,9949	1,9794	0,0003	1,0319
2000	700	3,5	699,8400	3,4490	0,0229	1,4567
2000	1100	3,5	1099,9022	3,4588	0,0089	1,1775
2000	1400	3,5	1399,9190	3,4471	0,0058	1,5128

Observa-se que a RNA aprendeu a entender o problema estudado, com erros médios de 0,1382 % para localização de falta e 1,1475 % para o valor de resistência de falta, poderá ser utilizado como ferramenta para auxiliar na localização de faltas em sistemas subterrâneos.

5.10.1 Resumo dos Resultados

Apesar do número de 190 amostras de treinamento a RNA se mostrar eficiente tanto para a estimação do local da falta, quanto para o valor da resistência de falta. O aumento da base de dados já se mostrou um bom caminho para de melhorar a eficiência da RNA, uma vez que ela ajusta seus pesos de acordo com o banco de dados de treinamento de forma supervisionada. Os valores baixos de porcentagem de erro médio são animadores, mas o que mais chama atenção é a baixa diferença de metros de erro, tento como máximo neste estudo 4,5 metros, sendo que as concessionárias vêm trabalhando com uma faixa de 20 à 30 metros.

5.11 Avaliação do Desempenho da Variação da Quantidade de Dados de Entrada

Para avaliar o desempenho das RNAs com a troca dos dados de entrada, foi utilizado o banco de 458 amostras para treinamento e validação e o banco de dados de teste com 30 amostras para avaliar o erro de cada rede neural estudada.

A Figura 24 apresenta os erros das 30 amostras de acordo com os dados de entrada e a Figura 24 apresenta o gráfico de barras do erro médio para cada uma das configurações de dados de entrada.

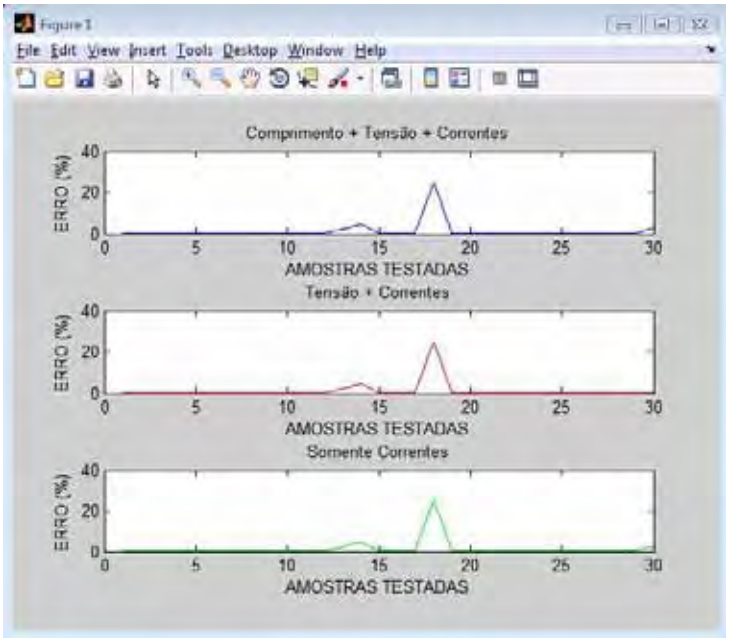


Figura 5.24 – Gráfico dos Erros para cada Configuração de Dados de Entrada

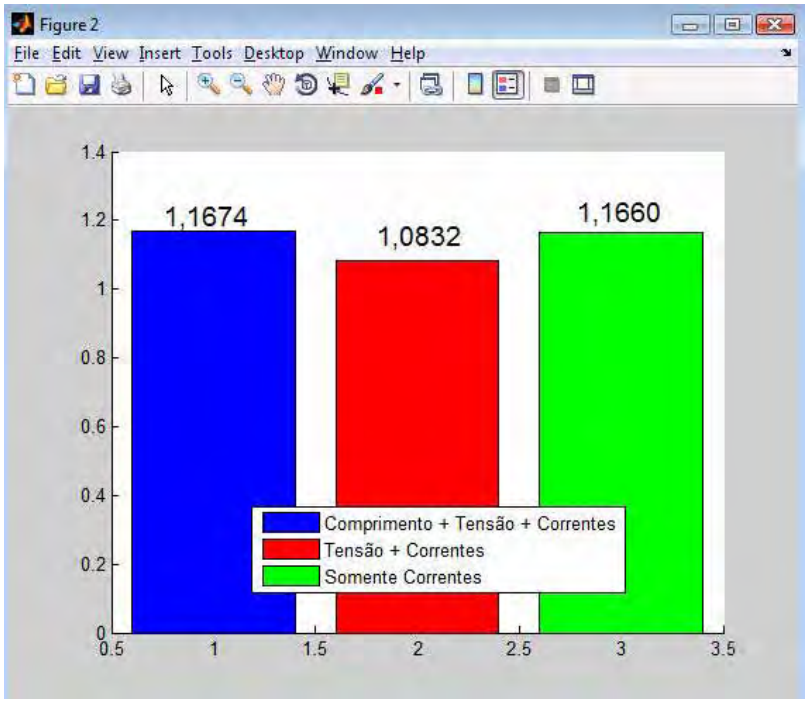


Figura 5.25 – Gráfico de Barras do Erro Médio para cada Configuração de Dados de Entrada

5.11.1 Resumo dos Resultados

A barra azul da Figura 25 possui o maior erro médio, e têm quarto dados de entrada. Ao se retirar a variável dependente (comprimento do cabo) houve um decréscimo no erro médio, porém ao se retirar mais uma variável (a tensão), o erro médio voltou a aumentar. Assim, pode-se concluir que a RNA possui um número mínimo de dados de entrada para que ela entenda o problema de forma mais precisa, mas que todas estas configurações propostas possuem um bom resultado e podem ser utilizadas para o estudo de localização de faltas de acordo com os dados fornecidos na análise em campo.

6 CONCLUSÃO

6.1 Conclusões Gerais

A principal contribuição deste trabalho está fundamentada no estudo da possibilidade de utilização de redes neurais artificiais (RNA) para auxiliar na localização de faltas em sistemas subterrâneos de distribuição de energia elétrica, diminuindo o erro de localização da falta pela equipe de operação, diminuindo custos e tempo de reparo, melhorando os índices de qualidade de energia e de restauração de falhas DEC e FEC.

A pesquisa realizada durante esta dissertação envolveu uma ampla investigação técnico-científica sobre os sistemas subterrâneos, tendo como objetivo mostrar as vantagens e desvantagens do sistema subterrâneo, avaliando dados estéticos, econômicos, técnicos, e a preocupação ambiental. Dentro da análise técnica a discussão deste trabalho avalia a utilização de redes neurais para auxiliar nos métodos de localização de falhas, quando ocorre uma falta fase-terra, pois segundo concessionárias é o tipo de falta mais corrente.

Inicialmente foi abordado o histórico das redes subterrâneas de energia, apresentando sua vantagem estética, e a preocupação ambiental. Posteriormente foram apresentadas as características das redes subterrâneas, com dados de construção, e instalação das redes subterrâneas. Foi feita uma análise de viabilidade econômica de instalação de rede subterrânea em comparação com as redes convencionais aéreas, mostrando que os altos investimentos iniciais de instalação, são compensados com os gastos que as redes aéreas têm com maior número de registros de manutenção e também com podas de árvores.

Em seguida foram estudados os métodos de localização de faltas conhecidos mundialmente, apresentando seus conceitos, suas metodologias e suas aplicabilidades. Os métodos de localização de faltas podem ser divididos em dois grandes grupos, os métodos dos terminais e os métodos traçadores.

Na sequência, são apresentadas as ferramentas computacionais utilizadas na pesquisa. É apresentado também um pequeno resumo de redes neurais artificiais, se preocupando em apresentar alguns tipos de redes neurais como MLP, RBF, GRNN e PNN, além de diversos tipos de treinamento do algoritmo *BackPropagation*, pois estes tipos de treinamento foram avaliados.

Para validar o estudo desenvolvido, foram feitas simulações com o PSCAD/EMTDC e também com algoritmos e RNAs implementadas em MATLAB.

Este trabalho se preocupou em avaliar como cada parâmetro (localização da falta, comprimento do cabo, resistência de falta) influencia o problema de localização de falta, de forma individual, apresentando e discutindo a resposta das RNA diante da influência de cada um destes parâmetros.

Os resultados apresentados pelas RNAs nesta pesquisa são satisfatórios, o que incentiva a continuidade do estudo e coloca as RNAs como uma boa ferramenta de análise de localização de faltas. Contudo, é importante salientar que os dados apresentados neste trabalho são dados de simulações, aonde os dados dos cabos permanecem sempre constantes, sem alteração de suas características em todo seu comprimento, portanto, é muito importante avaliar a utilização da metodologia estudada em sistemas reais de redes subterrâneas.

6.2 Trabalhos Futuros

Uma das propostas de trabalho futuro é aumentar a complexidade dos circuitos simulados para levantamento de dados, considerando, por exemplo, diferentes características do cabo (blindagem, isolamento), diferentes topologias de rede (anel, radial, e reticulado) e também possíveis variações da composição dos cabos em um mesmo circuito, aproximando-se ao máximo das características existentes em campo. Um estudo das RNA com dados reais de campo também se torna necessário para validar o uso das mesmas para a localização de faltas em sistemas subterrâneos de energia.

Outra proposta de estudo é avaliar outras ferramentas inteligentes, comparando tanto os resultados com simulações, como os resultados com dados reais. A comparação de ferramentas inteligentes é muito comum atualmente. Uma ferramenta que vêm sendo comparada com as RNAs é o SVM (Máquina de Vetor de Suporte), que também tem como característica ser boa em problemas de regressão, pois é uma aproximadora universal de funções lineares e não-lineares.

6.3 Publicações Durante a Pesquisa

Durante a execução desta pesquisa foram publicados alguns trabalhos com os resultados preliminares obtidos, e também, trabalhos realizados com o grupo de pesquisa (LSISPOTI), em eventos científicos.

Trabalhos Relacionados com o Tema da Pesquisa

- Danilo Sinkiti Gastaldello, André Nunes de Souza, Caio César Oba Ramos, Pedro da Costa Junior, Maria Goretti Zago. **Fault Location in Underground Systems Using Artificial Neural Networks and PSCAD/EMTDC**. INES 2012 – IEEE 16th Internacional Conference on Intelligent Engineering Systems 2012, Lisboa, Portugal, 2012.
- Danilo Sinkiti Gastaldello, André Nunes de Souza, Maria Goretti Zago, Haroldo L. M. do Amaral, Caio César Oba Ramos e João Paulo Papa. **Metodologia de Localização de Faltas em Redes de Distribuição Subterrâneas Integrando PSCAD/EMTDC e Redes Neurais Artificiais**. 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Fortaleza - CE, 2012.
- Danilo Sinkiti Gastaldello, André Nunes de Souza, Haroldo L. M. do Amaral, Maria Goretti Zago, Caio César Oba Ramos. **Estudos para Localização de Faltas em Redes Subterrâneas Integrando o Software PSCAD/EMTDC e Ferramentas Inteligentes**. SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2012, Goiânia, Goiás, 2012.
- Danilo Sinkiti Gastaldello, André Nunes de Souza, Daniele Furushima Akyoshi, Maria Goretti Zago. **Ferramentas Computacionais Aplicadas no Estudo de Transitórios em Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia**. Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, CLAGTEE 2011, Mar del Palta, Argentina, 2011.
- André Nunes de Souza, Ricardo de Oliveira Brandão, Sunny Jonathan, Pedro da Costa Junior, Danilo Sinkiti Gastaldello, Maria Goretti Zago, João Paulo Papa. **Desenvolvimento de um Software Especialista Inteligente para Identificar Falhas em Cabos Subterrâneos**. Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, CLAGTEE 2011, Mar del Palta, Argentina, 2011.
- Danilo Sinkiti Gastaldello, André Nunes de Souza, Daniele Furushima Akiyoshi, Maria Goretti Zago. **Estudo Computacional de Localização de Faltas em Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica**. Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, DINCON 2011, Águas de Lindóia, São Paulo, Brasil, 2011.

Trabalhos Relacionados com o Grupo de Pesquisa (LSISPOTI)

- André N. de Souza, Caio C. O. Ramos, Danilo S. Gastaldello, M. R. Y. Nakamura, João P. Papa. **Fast Fault Diagnosis in Power Transformers Using Optimum-Path Forest**. INES 2012 – IEEE 16th Internacional Conference on Intelligent Engineering Systems 2012, Lisboa, Portugal, 2012.
- André Nunes de Souza, Danilo Sinkiti Gastaldello, Caio César Oba Ramos, José Prado, Eurípedes Gusmão e João Paulo Papa. **Implementação de Ferramentas Inteligentes para Diagnóstico e Apoio à Decisão na Identificação de Falhas em Para-raios**. Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande - PB, 2012.
- Haroldo L. M. do Amaral, Maria Goretti Zago, André Nunes de Souza, Danilo Sinkiti Gastaldello. **Estudo de Impactos de Interferências Eletromagnéticas em Equipamentos Eletromédicos**. 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Fortaleza - CE, 2012.
- Caio C. O. Ramos, André N. de Souza, Danilo S. Gastaldello, João P. Papa. **Identificação e Seleção de Características de Perdas Comerciais para Consumidores Industriais Usando o Software WEKA**. 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Fortaleza - CE, 2012.
- Karila Martins dos Santos, André Nunes de Souza, Danilo Sinkiti Gastaldello, Caio César Oba Ramos, Pedro da Costa Junior. **Desenvolvimento de um Algoritmo para Determinar Curvas de Carga a partir da Posse e dos Hábitos de Consumo para Consumidores: Residenciais, Comerciais e Industriais**. SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2012, Goiânia, Goiás, 2012.
- André Nunes de Souza, Jônatas Padilha, Wallace Sato, Danilo Sinkiti Gastaldello, Caio César Oba Ramos, Karila Martins dos Santos. **Estudos para Identificação e Classificação de Harmônicos em Medição de Energia Elétrica Utilizando uma Arquitetura Neural**. SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2012, Goiânia, Goiás, 2012.
- Caio C. O. Ramos, André N. de Souza, Danilo S. Gastaldello, M. R. Y. Nakamura, João P. Papa. **Identificação de Perdas Não-Técnicas Utilizando Agrupamento de Dados por Floresta de Caminhos Ótimos**. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, SBAI 2011, São João del Rei, Minas Gerais, Brasil, 2011.

- Rodolfo B. Biazon, Vanice F. S. Dornellas, André N. de Souza, Danilo S. Gastaldello. **Estudo de Viabilidade de Custos de um Sistema Convencional e de um Sistema Híbrido para Aplicação na Eletrificação Rural**. Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, DINCON 2011, Águas de Lindóia, São Paulo, Brasil, 2011.
- Karila M. Santos, André N. de Souza, Danilo S. Gastaldello, Pedro da Costa Junior. **Uma Ferramenta Computacional Aplicada no Estudo de Curvas de Carga em Sistema de Energia**. Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, DINCON 2011, Águas de Lindóia, São Paulo, Brasil, 2011.
- Karila M. Santos, André N. de Souza, Danilo S. Gastaldello. **Uma Discussão sobre Hábito de Consumo de Energia e seus Impactos na Tarifa**. Simpósio Internacional de Iniciação Científica, SIICUSP 2001, São Carlos, São Paulo, Brasil, 2011.
- Karila M. Santos, André N. de Souza, Danilo S. Gastaldello. **Estudo de Hábitos de Consumo Residencial para o Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia**. Congresso de Iniciação Científica da UFSCAR, CICUFSCAR 2011, São Carlos, São Paulo, Brasil, 2011.
- André N. de Souza, Renato de Oliveira, Pedro da Costa Junior, Maria G. Zago, João P. Papa, Danilo S. Gastaldello. **Estimação de Carga como Suporte do Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, DINCON 2010, Serra Negra, São Paulo, Brasil, 2010.
- André N. de Souza, Lucas I. Pereira, Maria G. Zago, Pedro da Costa Junior, João P. Papa, Danilo S. Gastaldello. **Ferramentas Computacionais Aplicadas na Identificação e Classificação de Problemas de Qualidade de Energia Elétrica**. Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, DINCON 2010, Serra Negra, São Paulo, Brasil, 2010.
- André N. de Souza, André C. P. Martins, Pedro da Costa Junior, Danilo S. Gastaldello. **Medição de Potência Reativa na Presença de Distorção Harmônica**. IEEE/ IAS International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2010, São Paulo, Brasil, 2010.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à FAPESP pelo apoio financeiro, para aquisição da licença do software PSCAD/EMTDC através do projeto, 2010/12398-0, coordenado pelo professor André Nunes de Souza e ao CNPq pela concessão de uma bolsa de mestrado, 132649/2011-0, que foram de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional– PRODIST**. versão de 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>.

AQUINO, J. P., **Explosões de bueiro: A Mesma Ocupação Desordenada do Solo Carioca Acontece no Subsolo**. 2011.

BASCOM, E.; VON DOLLEN, D.; NG, H. **Computerized Underground Cable Fault Location Expertise**. In: Transmission and Distribution Conference, 1994., Proceedings of the 1994 IEEE Power Engineering Society. Anais... . p.376-382. doi: 10.1109/TDC.1994.328403, 1994.

BEAMENT, I.; MOORE, D.; SCOTT, G. 1999. **Watts Under London** Chairman's Address delivered to IEEE Power Division; October.

BECKER, L.; CLOETE, J.; READER, H. **Radio Frequency Coupling Between an Antenna and Two Unshielded Parallel Wires above a Metal Sheet-Measurement Precautions.** Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, v. 43, n. 1, p. 85-88. doi: 10.1109/15.917946, 2001.

BUHMANN, M. D., **Radial Basis Functions: Theory and Implementations**, Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics, 2006.

BUNGAY, E. W. G.; MCALLISTER, D. **Electric Cables Handbook**. BSP Professional Books, 1990.

CLEGG, B. **Underground Cable Fault Location**. McGraw-Hill, 1993.

CORREA, A. P.; BORGES, J. P.; NOGUEIRA, L. R. - **Rede de Distribuição Subterrânea de Energia Elétrica.** Apresentado no XIII INIC, São Paulo, BRA, outubro, 2009.

DAUD, M.; CIUFO, P.; PERERA, S. **Investigation on the Suitability of PSCAD/EMTDC Models to Study Energisation Transients of 132 kV Underground Cables.** In: Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities. Anais. . p.1-6, 2008.

DAUD, M. **Transient Behaviour Modelling of Underground High Voltage Cable Systems.** University of Wollongong Thesis Collection. Recuperado Julho 20, 2010, de http://ro.uow.edu.au/theses/2032, 2009.

ELLER, N. A. **Arquitetura de Informação para o Gerenciamento de Perdas Comerciais de Energia Elétrica.** Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ELMQVIST H. **A Structured Model Language for Large Continuous Systems**. Lund Institute of Tecnology, 1978.

FILOMENA, A. D. **Localização de Defeitos em Alimentadores Primários Subterrâneos: Formulação Estendida Baseada na Impedância Aparente**. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Rio Grande do Sul, 2008.

GASTALDELLO, D. S.; SOUZA, A. N.; AMARAL, H. L. M.; ZAGO, M. G.; RAMOS, C. C. O. **Estudos para Localização de Faltas em Redes Subterrâneas Integrando o Software PSCAD/EMTDC e Ferramentas Inteligentes**. SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2012, Goiânia, Goiás, 2012.

GASTALDELLO, D. S.; SOUZA, A. N.; AKIYOSHI, D. F.; ZAGO, M. G. **Estudo Computacional de Localização de Faltas em Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica**. Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, DINCON 2011, Águas de Lindóia, São Paulo, Brasil, 2011.

GASTALDELLO, D. S.; SOUZA, A. N.; AKIYOSHI, D. F.; ZAGO, M. G. **Ferramentas Computacionais Aplicadas no Estudo de Transitórios em Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia**. Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, CLAGTEE 2011, Mar del Palta, Argentina, 2011.

GILANY, M.; IBRAHIM, D.; ELDIN, E. A. **Wavelet-Based Fault Location Scheme for Multiend-Aged Underground Cable System**. IEEE Transactionson Power Delivery, v. 22, n. 1, p. 82-89, 2007.

GOMES, C.; GOMES, H.; VIEIRA, P. **Utilização de Redes Neurais Artificiais para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica.** XXXII

Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, CNMAC, Cuiabá MT, 2009.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON JR., W.D. **Power System Analysis.** New York, NY: McGraw-Hill, 1994.

GULDBRAND, A.; SAMUELSSON, O. **Central or Local Compensation of Earth-Fault Currents in Non-Effectively Earthed Distribution Systems**. In: Power Tech, 2007 IEEE Lausanne. Anais... . p.1129-1134. doi: 10.1109/PCT.2007.4538474, 2007.

GULSKI, E.; PUTTER, H.; SMIT, J. J. **Investigation of Water Treeing - Electrical Treeing Transition in Power Cables**. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 2008.

HAYKIN, S. **Redes Neurais: Princípios e Prática.** 2a. Edição, Porto Alegre: Bookman, 2001.

HEIMES, F.; HEUVELN, B.V. **The Normalized Radial Basis Function Neural Network**, IEEE International Conference On Systems, Man, And Cybernetics, Vol. 2, PP. 1609-1614, 1998.

HO, C. M.; LEE, W. K. E HUNG, Y. S. **Signature Representation of Underground Cables and its Applications to Cable Fault Diagnosis**. Electronic Engineering, n. December, p. 861-865, 1993.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Std 1234TM-2007, **IEEE Guide for Fault-Locating Techniques on Shielded Power Cable Systems**, 2007.

JAE-DUCK, L.; HEESUK, R.; SANGBONG, C.; KEEYOUNG, N.; SEONGHWAN, J.; DAEKYEONG, K. **Signal Processing Technology for Fault Location System in Underground Power Cable.** Korea Electrotechnology Research Institute, 2006.

KELMAN, J. - **Rede Subterrânea, Relatório Publicado pelo Presidente da LIGHT, 2011**, disponível em: < http://www.light.com.br/web/relatorio-sistema-distribuicao-subterraneo.pdf>. Acesso em: maio de 2011.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. CRC press, 2006.

LANDMAN, R. J. **Underground Secondary AC Networks, a Brief History.** IEEE Conference on the History of Electric Power 2007, Newark, NJ, USA.

LI, K.; LAI, L.; DAVID, A. **Application of Artificial Neural Network in Fault Location Technique.** In: International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2000.

LIGHT. **Rede de Distribuição Subterrâneas**. Rio de Janeiro, 2011

MAGALHÃES, C. E. P.; GOUVÊA, M. R. - **Avaliação do Impacto Técnico Econômico e Urbanístico de Redes de Distribuição Aéreas e Subterrâneas**, apresentado no XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2006.

MATSUMOTO, É. **MATLAB 6.5 Fundamentos de Programação**. Érica, 2004.

MOSHTAGH, J.; AGGARWAL, R. **A New Approach to Fault Location in a Single Core Underground Cable System Using Combined Fuzzy Logic and Wavelet Analysis**. In: Developments in Power System Protection, 2004. Eighth IEE International Conference on. Anais... . v. 1, p.228-231 Vol.1, 2004.

MYEON-SONG CHOI; SEUNG-JAE LEE; DUCK-SU LEE; BO-GUN JIN. **A New Fault Location Algorithm Using Direct Circuit Analysis for Distribution Systems**. Power Delivery, IEEE Transactions on, v. 19, n. 1, p. 35-41. doi: 10.1109/TPWRD.2003.820433, 2004.

NAIDU, S. R. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. Campina Grande, Brasil: Editora Grafset, 1985.

NOGUEIRA, J. F. S. - **Comissionamento de Cabos Subterrâneos de Média Tensão em Parques Eólicos** – Monografia em Sistemas Elétricos de Potência, Universidade Federal do Ceará. Defendida em 2009.

PANSINI, A. J.; E SMALLING, K. D. - **Undergrounding Electric Lines**. 2ND Edition (1993).

PELEGRINI, M. A.; CYRILLO, I. O. - **Conversão de Redes Aéreas em Subterrâneas - Análise da Disposição a Pagar dos Consumidores Residenciais da AES Eletropaulo**, apresentado no V Encontro de Redes Subterrâneas, 2009.

PIRELLI. **Fios e Postes, Desapareçam!** - Revista Pirelli Club, n.12, p. 8-12. 2000. Disponível em: < http://www.prysmianclub.com.br/revista/PClub_12/ >. Acesso em: maio de 2011.

POTIVEJKUL, S.; KERDONFAG, P.; JAMNIAN, S.; KINNARES, V. **Design of a Low Voltage Cable Fault Detector**. In: Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE. nais . v. 1, p.724-729 vol.1. doi: 10.1109/PESW.2000.850153, 2000.

PRYSMIAN, **Rede de Distribuição,** disponível em: < http://www.desenvolvimentoeconomico.al.gov.br/arquivos/seminario-instalacao-de-rede-subterranea-de-distribuicao-de-energia-eletrica/ >. Acesso em: maio de 2011.

ROBBA, E. J. - **Planejamento do Sistema Elétrico de Distribuição – Redes Subterrâneas são economicamente viáveis?** , apresentado no II Encontro Técnico de Redes Subterrâneas de Distribuição de Energia Elétrica, 2004.

SAITO, J. H. **Aula 5: Multilayer Perceptron. Notas de Aula**. Disponível em: <www2.dc.ufscar.br/~saito>. Acesso em: 10 jun. 2011.

SHEPHERD, A. J., **Second-Order Methods for Neural Networks – Fast and Reliable Methods for Multi-Layer Perceptrons**, Springer, 1997.

SILVA, M. **Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando a Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Carlos, 2003.

SOUZA, A. N., BRANDÃO, R. O., JONATHAN, S., COSTA JUNIOR, P., GASTALDELLO, D. S., ZAGO, M. G., PAPA, J. P. **Desenvolvimento de um Software Especialista Inteligente para Identificar Falhas em Cabos Subterrâneos**. Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, CLAGTEE 2011, Mar del Palta, Argentina, 2011.

SPECHT, D. F., **Probabilistic Neural Networks And The Polynomial Adaline As Complementary Techniques For Classification**, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 1, nº. 1 , 1990

STAKER, B**. Underground Cable Fault Locating Using the Arc Reflection Method**. Disponível em: <http://www.allbusiness.com/utilities/electric-power-generation/667474-1.html> Acesso em jul. 2003

TAFNER, M. A. **O que são as Redes Neurais Artificiais.** Disponível em: <http://www.cerebromente.org.br/n05/tecnologia/rna.htm>. Acesso em: 17 dez. 2008.

TANAKA, T.; GREENWOOD, A. **Advanced Power Cable Technology**. CRC Press. 1983.

TENG, H.; LIU, C.; HAN, M.; MA, S.; GUO, X. **IEEE9 Buses System Simulation and Modeling in PSCAD**, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific, 2010, pp. 1-4.

WIGGINS, C.; THOMAS, D.; SALAS, T.; NICKEL, F.; NG, H. **A Novel Concept for URD Cable Fault Location**. Power Delivery, IEEE Transactions on, v. 9, n. 1, p. 591-597. doi: 10.1109/61.277733, 1994.

XIA YANG; MYEON-SONG CHOI; SEUNG-JAE LEE; CHEE-WOOI TEN; SEONG-IL LIM. **Fault Location for Underground Power Cable Using Distributed Parameter Approach.** Power Systems, IEEE Transactions on, v. 23, n. 4, p. 1809-1816. doi: 10.1109/TPWRS.2008.2002289, 2008.