

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CRISTIANE RUIZ GOMES

LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO  
DECOMPOSIÇÃO HARMÔNICA E REDES NEURAS ARTIFICIAIS

DM 20/2006

UFPA / CT / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CRISTIANE RUIZ GOMES

LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO  
DECOMPOSIÇÃO HARMÔNICA E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Dissertação submetida à Banca  
Examinadora do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica da  
UFPA para a obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica

UFPA / CT / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO  
DECOMPOSIÇÃO HARMÔNICA E REDES NEURAS ARTIFICIAIS

AUTORA: CRISTIANE RUIZ GOMES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA.

APROVADA EM 05/07/2006

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Petrônio Vieira Junior  
(ORIENTADOR – UFPA)

---

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra  
(MEMBRO – UFPA)

---

Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira  
(MEMBRO – UFPA)

---

Prof. Dr. João Antônio Corrêa Pinto  
(MEMBRO – CEFET-PA)

VISTO:

---

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes  
(COORDENADOR DO PPGEE/CT/UFPA)

UFPA / CT / PPGEE

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Hermínio e Marta que desde minha infância me ensinaram, me apoiaram e me valorizaram. Que estiveram ao meu lado em todo o decorrer deste trabalho, que sempre acreditaram em mim.

À meu esposo Everaldo, pelo constante incentivo e compreensão.

À meu irmão Igor, pelos momentos de descontração enquanto escrevia este texto.

Em especial ao Prof. Dr. Petrônio Vieira Junior, pela sua sábia orientação, apoio e amizade.

Aos colegas de pós-graduação Lucélio e Klaus, pelo fornecimento de dados e modelos de linhas de transmissão.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de usufruir espaços, livros, equipamentos, em suma, por toda a estrutura a mim proporcionada.

À Universidade Federal do Pará, pelo suporte desde minha graduação.

Aos professores e colegas, pela colaboração e paciência.

## SUMÁRIO

|  |      |
|--|------|
| AGRADECIMENTOS .....   | iv   |
| SUMÁRIO .....  | v    |
| LISTA DE FIGURAS .....   | viii |
| LISTA DE TABELAS .....   | x    |
| LISTA DE SIMBOLOGIAS .....   | xi   |
| LISTA DE ABREVIACÕES .....   | xii  |
| RESUMO .....   | xiii |
| ABSTRACT .....   | xiv  |
| <br>   |      |
| INTRODUÇÃO.....  | 1    |
| Objetivos.....   | 4    |
| Organização do Trabalho.....   | 4    |
| <br>   |      |
| CAPÍTULO 1: LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....                      | 5    |
| 1.1. Introdução.....   | 5    |
| 1.2. Descrição das Linhas de Transmissão .....                                       | 6    |
| 1.2.1. Características Físicas das Linhas de Transmissão .....                       | 7    |
| 1.3. Técnicas de Monitoramento de Linhas de Transmissão.....                         | 11   |
| 1.4. Falhas em Linhas de Transmissão .....   | 13   |
| 1.4.1. Sobretensões Atmosféricas:.....   | 14   |
| 1.4.2. Sobretensões de Manobra:.....   | 14   |
| 1.4.3. Sobrecorrentes: .....   | 15   |
| 1.5. Métodos de Localização de Faltas.....   | 15   |
| 1.5.1. Métodos de Localização de Faltas Utilizando Dados de Um Terminal. ....        | 16   |
| 1.5.2. Métodos de Localização de Falta Utilizando Dados de Dois e Três Terminais.... | 21   |
| 1.5.3. Métodos de Localização de Faltas Baseados na Teoria de Ondas Viajantes .....  | 25   |
| 1.5.4. Métodos de Localização de Faltas Utilizando Redes Neurais Artificiais. ....   | 27   |
| 1.5.5. Comentários e Comparações entre os Métodos de Localização de Faltas. ....     | 30   |
| Conclusão .....  | 31   |

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 2: MODELOS MATEMÁTICOS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO.....   | 32 |
| 2.1. Introdução.....  | 32 |
| 2.2. Breve Histórico.....   | 34 |
| 2.3. Modelos Mais Utilizados.....   | 36 |
| 2.3.1. Modelo Pi Concentrado.....   | 36 |
| 2.3.2. Modelagem Modal.....   | 36 |
| 2.3.3. Modelagem no Domínio de Fase.....  | 38 |
| 2.4. Modelo Utilizado.....  | 40 |
| Conclusão.....  | 44 |
| <br>  |    |
| CAPÍTULO 3: METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DE DADOS .....  | 45 |
| 3.1. Introdução.....  | 45 |
| 3.2. Monitoração de um Linha de Transmissão .....   | 45 |
| 3.3. Escolha da LT para ser monitorada.....   | 46 |
| 3.4. Parâmetros da Linha de Transmissão Escolhida .....   | 48 |
| 3.5. Discussão Sobre o Cálculo da Capacitância.....   | 50 |
| 3.6. Descrição do Equipamento de Monitoração.....   | 51 |
| 3.6. Instalação do Analisador .....   | 51 |
| 3.7. Instalação do GPS.....   | 56 |
| 3.8. Obtenção e Armazenamento dos Dados.....  | 57 |
| Conclusão.....  | 58 |
| <br>  |    |
| CAPÍTULO 4: SIMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO .....  | 59 |
| 4.1. Introdução.....  | 59 |
| 4.2. O Programa de Simulação .....  | 59 |
| 4.3. Obtenção da Corrente de Fuga em uma LT.....  | 61 |
| 4.4. Metodologia Empregada na Simulação.....  | 63 |
| Conclusão.....  | 69 |
| <br>  |    |
| CAPÍTULO 5: REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS APLICADAS A DETERMINAÇÃO DA<br>LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO..... | 71 |
| 5.1. Definição de Redes Neurais Artificiais .....   | 71 |
| 5.2. Breve Histórico.....   | 72 |
| 5.3. Modelo de um Neurônio.....   | 73 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.4. Processos de Aprendizagem .....   | 74  |
| 5.5. A Rede Neural Direta Multicamada .....  | 76  |
| 5.6. O Algoritmo de Retropropagação de Erro.....                                   | 77  |
| 5.7. Rede Neural Desenvolvida para Localizar Falhas em Linhas de Transmissão ..... | 81  |
| 5.8. Comentários sobre os resultados .....   | 90  |
| Conclusão .....  | 90  |
| <br>   |     |
| CONCLUSÕES .....   | 92  |
| Continuidade da Pesquisa.....  | 94  |
| <br>   |     |
| REFERÊNCIAS .....  | 95  |
| <br>   |     |
| APÊNDICES .....  | 99  |
| APÊNDICE A: Rotina de Validação do Modelo Pi.....                                  | 99  |
| APÊNDICE B: Tratamento de Dados. ....  | 100 |
| APÊNDICE C: Saída em formato texto fornecida pelo modelo Pi.....                   | 105 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. 1 – Estrutura da torre com disposição triangular dos condutores (a) assimétrica; (b) simétrica .....   | 9  |
| Figura 1. 2 - Estruturas de torres com disposição horizontal dos cabos condutores. (a) Autoportante; (b) Estaiada.....   | 10 |
| Figura 1. 3 – Estrutura de torre com disposição vertical dos condutores.....   | 10 |
| Figura 1. 4 – Esquema de transposição de cabos condutores.....   | 11 |
| Figura 1. 5 – (a) Linha em situação de falta; (b) Linha em situação de pré-falta; (c) Linha em situação de falta-pura.....   | 17 |
| Figura 1. 6 – Representação unifilar de uma LT com três terminais com falta no trecho PT..   | 25 |
| <br>   |    |
| Figura 2. 1 – Linha de transmissão genérica. ....  | 41 |
| <br>   |    |
| Figura 3. 1– Linha de transmissão GUAMÁ – UTINGA - MIRAMAR pertence a ELETRONORTE. ....  | 46 |
| Figura 3. 2 - Torre e distância entre as linhas para a LT/ELETRONORTE tipo SOD– Guamá – Utinga. (a) Vista frontal; (b) detalhe dos braços. ....  | 48 |
| Figura 3. 3 - Distribuição do potencial elétrico em uma cadeia de isoladores próxima à torre da linha de transmissão.....  | 50 |
| Figura 3. 4 - Vista da entrada das SEs de (a) Guamá e (b) Utinga.....  | 52 |
| Figura 3. 5– Esquemático da ligação do 1133A nas subestações do Guamá e Utinga. ....   | 52 |
| Figura 3. 6 – Aquisição dos valores de tensão e corrente.....  | 53 |
| Figura 3. 7 – Esquemático da ligação a partir do quadro QP-EX3 na SE-Guamá. ....   | 54 |
| Figura 3. 8 – Esquemático da ligação a partir do quadro QP-EX3 na SE-Utinga.....   | 54 |
| Figura 3. 9 - Aspectos da localização e instalação do medidor na SE-Guamá (a) Vista do medidor instalado em painel; (b) Vista das ligações no interior do painel; (c) Porta traseira do painel aberta para aquisição de dados; (d) Aspecto das ligações ao TC e TP, ainda com Cartões de Serviço ..... | 55 |
| Figura 3. 10 - Aspectos da localização e instalação do medidor na SE Utinga (a) Vista do medidor instalado em painel; (b) Vista das ligações no interior do painel.....  | 56 |
| Figura 3. 11 - Instalação do GPS na SE-Guamá (a) Vista externa da instalação; (b) Instalação da proteção contra descargas atmosféricas.....  | 56 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3. 12 - Instalação do GPS na SE-Utinga (a) Vista externa da instalação; (b) Instalação da proteção contra descargas atmosféricas..... | 57 |
| Figura 3. 13 - Aspecto da tela de entrada de dados no software PSCSV.....  | 58 |
| Figura 4. 1 – Modelo em estudo feito em Simulink.....  | 60 |
| Figura 4. 2 – Modelo Pi desenvolvido para cada torre.....  | 61 |
| Figura 4. 3 – Introdução das três fases de (a) tensão e (b) corrente.....  | 61 |
| Figura 4. 4 – Aplicação do teorema de Gauss para superfícies fechadas para um trecho de linha de transmissão.....                            | 62 |
| Figura 4. 5 – Corrente de fuga gerada (a) pela rotina feita utilizando a teoria de superfícies fechadas; (b) o modelo Pi desenvolvido.....   | 63 |
| Figura 4. 6 – Formas de onda das três fases de tensão e corrente obtidas a partir de dados numéricos de 50 harmônicos.....                   | 64 |
| Figura 4. 7 – Lista de porcentagens da decomposição harmônica da corrente de fuga obtida via simulação.....                                  | 65 |
| Figura 4. 8 - Forma de onda da corrente de fuga para uma falha na torre 1 considerando a capacitância $C_3$ .....                            | 66 |
| Figura 4. 9 - Espectro harmônico da corrente de fuga para uma falha na 1ª torre com capacitância $C_3$ .....                                 | 67 |
| Figura 4. 10 - Espectro harmônico da corrente de fuga para uma falha na 5ª torre com capacitância $C_3$ .....                                | 67 |
| Figura 4. 11 - Espectro harmônico da corrente de fuga para uma falha na 10ª torre com capacitância $C_3$ .....                               | 67 |
| Figura 5. 1 – Modelo de um neurônio em diagrama de blocos.....   | 74 |
| Figura 5. 2 – Organograma de procedimento do trabalho.....   | 83 |
| Figura 5. 3 – Arquitetura da RNA desenvolvida.....   | 84 |
| Figura 5. 4 – Desempenho da RNA desenvolvida com meta de 0,05.....   | 85 |
| Figura 5. 5 - Desempenho da RNA desenvolvida com meta de 0,1.....  | 88 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 3. 1 - Plano de Traçado do Sistema de Transmissão Tucuruí (LT 230 kV), trecho<br>Guamá – Utinga.....   | 47 |
| Tabela 3. 2 - Distância média entre as torres do trecho Guamá - Utinga.....   | 47 |
| Tabela 3. 3 - Quantidade e tipo de torres do trecho Guamá - Utinga.....   | 48 |
| Tabela 3. 4 – Comparação entre os valores calculados pelos métodos de elementos finitos,<br>matricial e dados reais fornecidos pela ELETRONORTE. ....                         | 50 |
| Tabela 4. 1 - Decomposição harmônica da corrente de fuga para uma falha em diferentes<br>trechos de uma linha de transmissão para uma mesma capacitância de falha $C_3$ ..... | 68 |
| Tabela 5. 1 – Dados que estavam no treinamento da rede (meta de 0,05) e valores obtidos<br>após o treinamento desta. ....   | 86 |
| Tabela 5. 2 – Dados de entrada e saída de testes (não pertenciam ao treinamento) para a meta<br>de 0,05. ....   | 87 |
| Tabela 5. 3 – Dados que estavam no treinamento da rede (meta de 0,1) e valores obtidos após<br>o treinamento desta.....   | 89 |
| Tabela 5. 4 – Dados de entrada e saída de testes (não pertenciam ao treinamento) para a meta<br>de 0,1. ....  | 89 |

**LISTA DE SIMBOLOGIAS**

|                |   |
|----------------|---|
| C              | Capacitância                              |
| L              | Indutância                                |
| R              | Resistência                               |
| I              | Corrente                                  |
| V              | Tensão                                    |
| $\ell$         | Comprimento total da linha de transmissão |
| $d$            | Distância da falta ao terminal local      |
| F              | Local da falta                            |
| Lc             | Localização                               |
| T <sub>L</sub> | Terminal local                            |
| T <sub>R</sub> | Terminal remoto                           |
| Y( $\omega$ )  | Matriz de admitância                      |
| H( $\omega$ )  | Matriz de deformação da onda              |
| A( $\omega$ )  | Matriz de propagação                      |

## LISTA DE ABREVIACÕES

|      |   |
|------|---|
| LT   | Linha de Transmissão                      |
| MEF  | Método de Elementos Finitos               |
| RNA  | Rede Neural Artificial                    |
| SE   | Subestação                                |
| TC   | Transformador de Corrente                 |
| TP   | Transformador de Potência                 |
| TDF  | Transformada Discreta de Fourier          |
| TW   | Transformada Wavelet                      |
| CA   | Corrente Alternada                        |
| CC   | Corrente Contínua                         |
| ATP  | <i>Alternative Transients Program</i>     |
| EMTP | <i>Electromagnetic Transients Program</i> |
| ARMA | <i>Auto Regressive Moving Average</i>     |
| THD  | Distorção Harmônica Total                 |
| GPS  | <i>Global Position System</i>             |

## RESUMO

Este trabalho propõe a utilização de uma nova metodologia para a localização de falhas em linhas de transmissão (LT). Esta metodologia consiste na utilização da decomposição harmônica da corrente de fuga de uma linha e na aplicação de uma Rede Neural Artificial (RNA) capaz de distinguir padrões da condição normal de funcionamento e padrões de situações de falhas de uma LT.

Foi utilizado um modelo Pi capaz de absorver dados reais de tensão e corrente de três fases e de alterar valores de R, L e C segundo modificações ambientais. Neste modelo foram geradas falhas em todas as torres com diferentes valores de capacitância. A saída fornecida pelo modelo é a decomposição da corrente de fuga do trecho considerado. Os dados de entrada e saída do modelo foram utilizados no treinamento da RNA desenvolvida.

A aquisição de dados reais de tensão e corrente foi feita através de analisadores de parâmetros de qualidade de energia elétrica instalados nas extremidades de um trecho de LT, Guamá-Utinga, pertencente à Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE. O cálculo dos parâmetros construtivos foi feito através do método matricial e melhorado através da utilização do Método de Elementos Finitos (MEF).

A RNA foi desenvolvida com o auxílio do software Matlab®. Para treinamento da RNA foi utilizado o algoritmo de Retropropagação Resiliente que apresentou um bom desempenho. A RNA foi treinada com dois conjuntos de dados de treinamento para analisar possíveis diferenças entre as saídas fornecidas pelos dois grupos. Nos dois casos apresentou resultados satisfatórios, possibilitando a localização de falhas no trecho considerado.

**PALAVRAS-CHAVES:** Localização de falhas, Linhas de transmissão, Redes neurais artificiais, Harmônicos, Sistemas de potência.

## ABSTRACT

This work proposes a new methodology for fails location in transmission lines. This methodology consists in using harmonic decomposition of the leakage current and in the application of an Artificial Neural Network (ANN), this is able to recognize patterns of normal and fails conditions of a transmission line.

It was developed a Pi model capable to use real data of voltage and current of the three phases. In this model values of capacitance, inductance and resistance can be modified in agreement of weather conditions. Fails were generated in all the towers with different values of capacitance. The input/output data were used to train the neural network.

The real voltage and current data acquisition were done by instruments installed in the two terminals of the Guamá-Utinga transmission line belonging to Centrais Elétricas do Norte - ELETRONORTE. The computation of the parameters was made by the well known matricial method and was improved by Finite Element Method.

An ANN was developed with Matlab® software. For training the ANN it was used the backpropagation resilient algorithm, which presented good performance, been fast and accurate. The ANN was trained by two different sets to analyze differences between outputs. In the two cases results were satisfactory.

**KEYWORDS:** Fails location, Transmission line, Artificial neural network, Harmonics, Power systems.

## INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um recurso de fundamental importância para o desenvolvimento econômico e social de um país. Portanto existe uma necessidade de garantir um alto grau de confiabilidade e continuidade na geração, transmissão, distribuição e utilização da energia.

No Brasil as principais fontes de geração de energia elétrica são as usinas hidroelétricas, isto faz com que, na maioria dos casos, haja grandes distâncias entre os centros geradores e consumidores. O transporte desta energia é realizado em vários níveis, porém as linhas de transmissão (LTs) são as linhas de maior complexidade funcional, uma vez que operam com as tensões mais elevadas do sistema, possuem as maiores estruturas e, por diversas vezes, encontram-se em lugares de difícil acesso. Todos estes fatores contribuem para que as LTs sejam os elementos mais susceptíveis do sistema.

A desregulamentação do sistema elétrico trouxe consigo a desverticalização do sistema e a introdução de novas fontes geradoras como a eólica, a solar e biomassa. Isto é, existem vários pólos geradores e é possível que a energia passe por várias zonas de responsabilidades até chegar ao consumidor. Isto acarreta um aumento da complexidade dos sistemas elétricos de potência em sua operação e manutenção.

As linhas de transmissão devem operar sem interrupções por grandes períodos, o que requer um bom nível de manutenção. Porém muitos são os fatores que podem causar falhas ou faltas em LTs. A falta é uma interrupção no fornecimento de energia elétrica, no entanto a falha pode ser qualquer tipo de problema apresentado numa LT que acarrete na alteração da condição normal de funcionamento do sistema elétrico.

A falta pode ser provocada pela ocorrência de diversos fenômenos eletromagnéticos ou pelo desgaste ou danos em componentes como isoladores, queda de torres ou rompimento de cabos ou emendas.

A manutenção pode ser realizada de duas formas: a manutenção pode ser planejada ou não planejada. A manutenção não planejada não possui programação e conseqüentemente não tem previsões de custos. Já a manutenção planejada mantém uma programação e controla seus serviços prevendo, assim, os possíveis gastos. A manutenção programada pode ser:

- Corretiva: geralmente acontece em situações de pós-falta para corrigir algum problema.
- Preventiva: É baseada na vida útil dos equipamentos, prevendo o desgaste destes.
- Preditiva: É baseada na monitoração periódica ou ocasional de um equipamento, analisando a condição deste para então programar trocas ou reparos.

A manutenção e a continuidade dos sistemas elétricos são de vital importância para muitos tipos de consumidores como hospitais, indústrias, frigoríficos e outros. A restituição dos serviços deve ser rápida ao ocorrer uma falta, portanto, é imprescindível a localização precisa desta para que o tempo despendido nos serviços de manutenção e reparo seja mínimo.

Apesar da necessidade de um elevado nível de manutenção nas LTs é praticada somente a manutenção de ocasião ou corretiva. A manutenção preditiva usualmente não é praticada devido ao seu elevado custo.

Uma técnica para reduzir o período de interrupção é localizar a falha empregando equipamentos localizadores nas subestações (SE).

Equipamentos digitais são amplamente empregados para localização de faltas. Estes utilizam basicamente dois tipos de métodos:

- 1) Métodos baseados em componentes de frequência fundamental;
- 2) Métodos baseados em transitórios de alta frequência gerados por uma situação de falta; estes são comumente chamados de métodos de ondas viajantes.

Ambos os métodos podem ser aplicados utilizando dados de um ou dois terminais de uma linha de transmissão.

Os algoritmos de localização de faltas que utilizam dados de apenas um terminal necessitam de dados de fasores de frequência fundamental de tensão e corrente medidos em um dos terminais da LT para a determinação da impedância aparente desta. Nestes métodos a determinação da localização da falta pode ser prejudicada devido à efeitos combinados da corrente de carga, da resistência, ângulo de incidência e outros.

Os algoritmos que utilizam dados sincronizados de dois terminais são, em geral, regidos pela mesma metodologia dos métodos anteriores, mas apresentam resultados com maior precisão, pois independem da impedância de falta, da distância desta e da configuração da LT.

Os algoritmos que utilizam o método de ondas viajantes consistem no cálculo do tempo de viagem das ondas de tensão ou corrente do ponto de falta ao terminal remoto. A principal dificuldade de implementação é a necessidade de elevadas taxas de frequência de amostragem, sendo necessários equipamentos muito precisos e de utilização exclusiva para a localização de falhas.

Novos paradigmas da computação têm auxiliado os especialistas na localização de faltas. Muitos trabalhos atuais utilizam as Redes Neurais Artificiais (RNAs) como ferramenta para os métodos baseados na frequência fundamental, outros utilizam a Transformada *Wavelet* (TW) para os métodos de ondas viajantes. O emprego destas novas ferramentas tem trazido grande melhoria nestes métodos, tornando os algoritmos mais robustos e rápidos.

Este trabalho propõe a utilização de uma metodologia inovadora, protegida pela patente 0000220600491835 de 19/04/2006, que permite uma manutenção preditiva através da determinação da localização e da capacitância de falha de uma LT segundo a decomposição harmônica da corrente de fuga de uma LT; Para tal empregou-se uma RNA capaz de distinguir padrões da condição normal de funcionamento de uma LT e padrões de situações de falha. É importante frisar que todos os trabalhos da literatura são de localização de faltas e a proposta do presente trabalho é a localização de falhas.

## **Objetivos**

Este trabalho tem por objetivo apresentar um novo método de localização de falhas em LT a partir da decomposição harmônica da corrente de fuga da mesma. O método tem como principais ferramentas o modelo e a RNA desenvolvidos. A RNA desenvolvida é capaz de fornecer a localização e a capacitância geradora de uma falha a partir da decomposição harmônica da corrente de fuga. As saídas da rede são ambas de grande importância, uma vez que uma delas localiza a falha a outra traz informações da condição da linha, ou melhor, é capaz de identificar o estado da LT e permite a prática da manutenção preditiva.

## **Organização do Trabalho**

O trabalho está dividido em cinco capítulos. No capítulo 1 são descritas as principais características das linhas de transmissão, técnicas de monitoramento e principalmente os principais trabalhos sobre métodos de localização de faltas em LTs.

O capítulo 2 descreve os modelos mais utilizados para as LTs incluindo o modelo proposto para o presente trabalho.

No capítulo 3 está descrita a metodologia de obtenção de dados. No capítulo 4 é mostrado o modelo desenvolvido assim como toda a metodologia de entrada de dados e seus tratamentos. No capítulo 5, tem-se inicialmente uma breve explanação sobre RNAs e posteriormente é apresentada a RNA desenvolvida para a localização de falha. Finalmente na conclusão estão expostas as principais conclusões do trabalho e idéias para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 1

### LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

#### 1.1. Introdução

As linhas de transmissão (LT) são desenvolvidas para operarem, em grande parte do tempo, em regime permanente. Mas sabe-se que diversos são os fatores causadores de faltas ou falhas. Estes podem ser solicitações extremas de tensão e/ou corrente, problemas envolvendo danificação total ou parcial de isoladores, ou ainda, fatores como queimadas ou chuvas intensas.

Dentre os componentes de um sistema elétrico de potência a linha de transmissão é o elemento mais susceptível a faltas, isto principalmente devido as suas dimensões e a exposição às intempéries. A prática mostra que entre 70% e 80% das faltas em linhas de transmissão são do tipo fase/terra e que cerca de apenas 5% das faltas são do tipo trifásicas [1]. Observa-se, também, que a maioria das faltas em LTs é transitória mas pode tornar-se permanente se a falta perdurar [2].

A localização de faltas em linhas de transmissão é muito importante para as empresas transmissoras de energia elétrica, pois uma localização precisa de uma falta permanente proporciona manutenção mais rápida, ensejando menor tempo de restabelecimento do sistema após perturbações [3] e [4]. Além de minimizar inconvenientes e prejuízos para os consumidores há uma diminuição de multas devido a interrupção de energia para as empresas transmissoras e distribuidoras de energia.

No caso de defeitos não permanentes é interessante obter a localização da falta visando informações valiosas para estudos de proteção, prevenção e análise de desempenho frente a surtos atmosféricos.

Os sistemas de energia elétrica organizam-se, de modo geral, em quatro níveis:

- geração ou produção: diferentes tipos de energia transformados em energia elétrica;
- rede de transmissão: transmite a energia elétrica em tensões elevadas (230 kV, 345 kV, 500 kV ou 750 kV) dos pólos geradores às subestações abaixadoras;
- rede de subtransmissão: executa a distribuição à granel da energia elétrica transportada pela rede de transmissão com tensões típicas de operação em 69 kV e 138 kV;
- rede de distribuição: distribui a energia elétrica principalmente aos consumidores comerciais e residenciais, atua em geral, até 34,5 kV.

Além desta organização vertical, atualmente observa-se uma organização onde muitas vezes, a geração está ligada diretamente à distribuição formando sistemas de geração distribuída, alargando assim a cadeia geração-transmissão-distribuição. Esta nova organização está grandemente vinculada à desregulamentação dos sistemas de energia, possibilitando a entrada de fontes de geração distribuída. A idéia da desregulamentação não é nova, porém, só recentemente foi colocada em prática.

A interligação dos sistemas de energia elétrica vem proporcionando grandes benefícios devido às possibilidades de intercâmbio de energia, de construção de centrais elétricas maiores e mais eficientes, o aumento da confiabilidade de abastecimento e de manutenção especializada e mais rápida. Todos estes fatores contribuem para uma geração e transmissão mais baratos e para uma melhoria da energia fornecida ao consumidor.

## **1.2. Descrição das Linhas de Transmissão**

O transporte de energia é realizado em diferentes níveis dependendo das tensões e quantidade de energia a ser transportada.

As linhas de transmissão operam com as tensões mais elevadas do sistema, tendo como função principal o transporte da energia entre os centros de produção e de consumo, como também a interligação de centros de produção e mesmo de sistemas independentes [5]. Em

geral são terminadas em subestações abaixadoras. É comum a existência de linhas de transmissão em dois ou mais níveis de tensão em um mesmo sistema.

As linhas de subtransmissão normalmente operam em tensões inferiores àquelas dos sistemas de transmissão. Sua função é a distribuição à granel da energia transportada pelas linhas de transmissão. Iniciam-se nos barramentos das subestações regionais e terminam em subestações abaixadoras locais.

É comum que as linhas de transmissão e subtransmissão se confundam, pois diversas vezes operam nas mesmas tensões e possuem as mesmas estruturas o que as torna semelhantes do ponto de vista elétrico e físico fazendo com que os métodos de cálculo sejam os mesmos [5]. Neste trabalho não será feita distinção entre as linhas de transmissão e de subtransmissão, sendo utilizado de modo genérico o termo linha de transmissão.

### **1.2.1. Características Físicas das Linhas de Transmissão**

As linhas de transmissão são basicamente constituídas por cabos condutores, cabos pára-raios, isoladores, e a estrutura de sustentação que é a torre propriamente dita.

- **Cabos Condutores**

Os cabos condutores são os elementos ativos de uma LT, suas características são importantes para um bom dimensionamento da linha. Estes devem ter:

- alta condutibilidade elétrica → para que as perdas por efeito Joule sejam minimizadas;
- baixo custo;
- boa resistência mecânica → assegurando a integridade física da linha, garantindo a continuidade do serviço e a segurança das propriedades e vidas em suas imediações;
- baixo peso específico → para que as estruturas de sustentação possam ser menores e menos dispendiosas;

- alta resistência á oxidação e à corrosão por agentes químicos → para que não venham a sofrer redução em sua secção com o decorrer do tempo. Os materiais que melhor atendem estas características são o cobre e o alumínio.

Inicialmente utilizou-se extensivamente o cobre, mas após o melhoramento do alumínio este passou a ser mais utilizado na fabricação de cabos. Atualmente os cabos são compostos por encordoamento de fios elementares que em geral são feitos de materiais diversos e diâmetros diversos.

- **Cabos pára-raios**

Os cabos pára-raios ocupam a parte superior das estruturas e tem como objetivo principal interceptar descargas de origem atmosférica e descarregá-las para o solo, evitando que causem danos e interrupção no sistema.

- **Isoladores**

Os cabos são suportados pelas estruturas através dos isoladores, que os mantêm isolados eletricamente das mesmas.

Os isoladores são eventualmente submetidos a diversas solicitações elétricas danosas, podendo ser estes surtos de tensão de manobra ou atmosférica, ou ainda, sobrecorrentes. Estes também são submetidos à solicitações mecânicas como as forças verticais e horizontais que são transmitidas pelos cabos condutores.

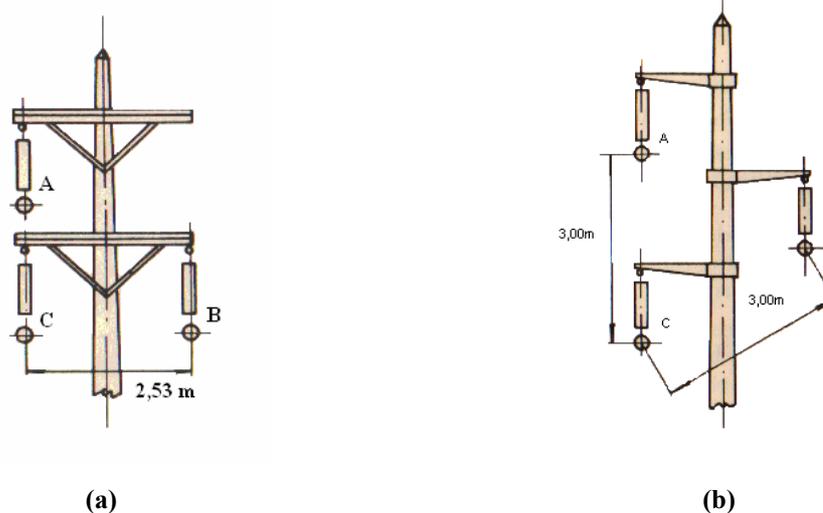
Para que tenham um bom desempenho é necessário que os isoladores tenham um formato que assegure uma distribuição balanceada de potenciais com o objetivo de assegurar tensões de descarga adequadas e que o material utilizado para a sua fabricação seja isolante. Os materiais mais utilizados para a fabricação destes são a porcelana vitrificada, o vidro temperado e o polímero.

Atualmente os isoladores de polímero são preferíveis, pois apresentam benefícios como: baixo peso, boa durabilidade, não quebram facilmente em casos de vandalismo e têm bom desempenho quanto a intempéries.

- **Estruturas das Linhas de Transmissão**

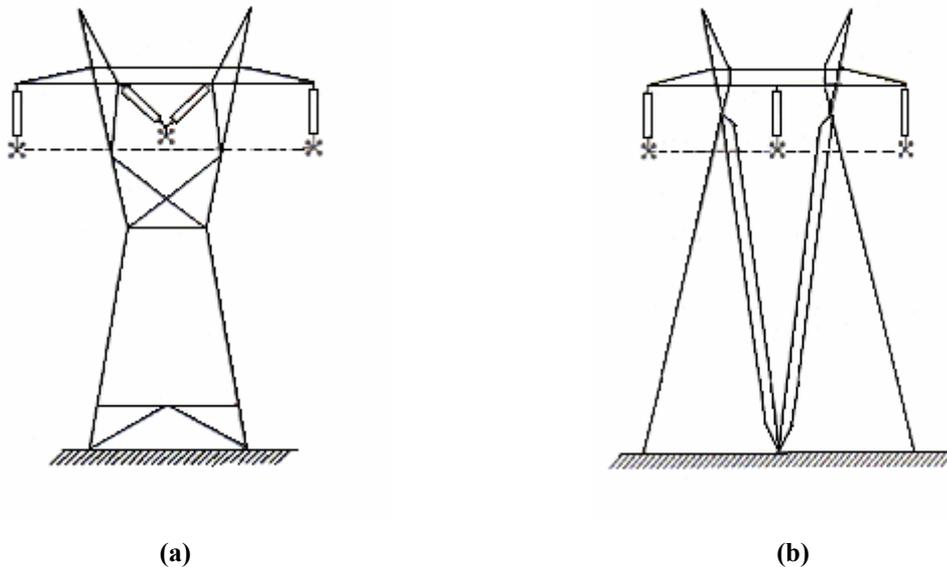
As estruturas constituem os elementos de sustentação dos cabos da linha de transmissão. Suas dimensões e formas dependem de diversos fatores como a disposição dos condutores, a distância entre os condutores, dimensões e formas de isolamento, flechas dos condutores, altura de segurança, materiais estruturais e número de circuitos. Devido a grande quantidade de classificações das estruturas será aqui abordada apenas a classificação das estruturas quanto à disposição dos condutores, podendo ter a disposição triangular, horizontal ou vertical.

Na disposição triangular os condutores estão dispostos segundo os vértices de um triângulo. Caso esta disposição forme um triângulo equilátero diz-se que a disposição é eletricamente simétrica; caso contrário diz-se assimétrica. As figuras 1.1a e 1.1b mostram duas estruturas triangulares.



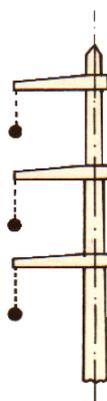
**Figura 1.1** – Estrutura da torre com disposição triangular dos condutores (a) assimétrica; (b) simétrica

Na disposição horizontal os condutores são fixados em um mesmo plano horizontal. Este pode ser simétrico ou assimétrico. Têm como principal vantagem o fato de terem menor altura para um mesmo condutor e vão, mas são estruturas mais largas. Estas disposições são mais utilizadas para linhas de circuito simples, para tensões elevadas e extra-elevadas. As figuras 1.2a e 1.2b ilustram este tipo de estrutura.



**Figura 1. 2** - Estruturas de torres com disposição horizontal dos cabos condutores. **(a)** Autoportante; **(b)** Estaiada.

Na disposição vertical os condutores ficam montados em um plano vertical, como mostra a figura 1.3. Esta disposição é bastante utilizada em linhas de circuito duplo e em linhas que acompanham vias públicas.



**Figura 1. 3** – Estrutura de torre com disposição vertical dos condutores.

Além desta classificação, as estruturas podem ser classificadas quanto à sua função na linha, quanto à sua forma de resistir e quanto ao material empregado em sua fabricação. Por fugirem ao escopo deste trabalho não serão aqui abordadas estas classificações. O tipo de linha de transmissão utilizado neste trabalho está totalmente descrito no capítulo 3.

A transposição de condutores de uma LT é utilizada para equilibrar eletricamente as linhas de transmissão, principalmente as linhas em paralelo e as de circuito duplo. O esquema de transposição mais utilizado está ilustrado na figura 1.4. Para tal transposição é necessário o emprego de duas ou três estruturas especiais, dependendo da necessidade de manutenção da seqüência de fase nas estruturas terminais.

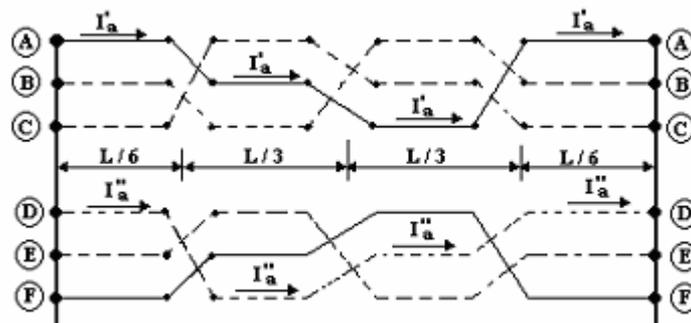


Figura 1. 4 – Esquema de transposição de cabos condutores.

### 1.3. Técnicas de Monitoramento de Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão, apesar de serem construídas para suportar variações de tensão e corrente, são muito susceptíveis à faltas. Para monitorar a situação de funcionamento de uma LT existem diversos métodos, sendo empregados de forma diferente de acordo com a região em que está a LT e de acordo com a disponibilidade de equipamentos para uma monitoração.

A monitoração pode ser periódica ou ocasional. A monitoração ocasional é realizada quando um equipamento começa a apresentar suspeita de falha. A monitoração periódica é feita mesmo sem suspeita de falha. É importante salientar que qualquer monitoração pode

fornecer uma curva de comportamento do equipamento monitorado. A análise deste comportamento prevê tendências antecipando, assim, possíveis falhas.

As inspeções periódicas podem ser terrestres, aéreas, por coronas ou termovisão.

A inspeção terrestre pode ser por patrulhamento, percorrendo a faixa da linha, ou detalhada que consiste em percorrer a faixa da linha realizando escaladas nas estruturas, ambas visam identificar ocorrências ou anormalidades.

A inspeção aérea consiste em sobrevoar a linha de transmissão, visando identificar ocorrências ou anormalidades.

A inspeção corona também consiste em sobrevoar a linha, porém utiliza um aparelho de medição de intensidade do efeito corona, visando identificar anormalidades nos cabos condutores e acessórios.

A inspeção por termovisão consiste na obtenção de imagens térmicas das partes energizadas da LT, visando identificar pontos quentes que são possíveis pontos de falhas.

As inspeções terrestres são dispendiosas, pois diversas são as vezes que o local de inspeção é distante e de difícil acesso. As inspeções aéreas, corona e de termovisão também são dispendiosas devido aos equipamentos usados, além disso, são perigosas devido à necessidade de vôos baixos.

Um monitoramento mais preciso é feito através de medições de parâmetros elétricos como os de tensão e corrente para o cálculo da capacitância da LT, ou ainda através de relés eletromecânicos, de estado sólido e mais recentemente os digitais. Os relés respondem às variações na impedância observada entre a localização do relé e a falta, determinando se a falta é interna ou externa a uma determinada zona de proteção.

Existem equipamentos sofisticados de monitoramento como os de medição fasorial sincronizada (*SPMS – Synchronized Phasor Measurement Systems*), estes são constituídos por unidades de medição fasorial (*PMU – Phasor Measurements Units*) e por um concentrador de

dados (*PDC – Phasor Data Concentrator*). A PMU é responsável pela aquisição dos fasores de tensão e corrente sincronizados no tempo em determinados pontos do sistema de energia elétrica sob monitoração. A PDC centraliza e disponibiliza as grandezas fasoriais. Este sistema de monitoramento já é utilizado em vários países e começa a ser utilizado também no Brasil como mostra a referência [2].

#### **1.4. Falhas em Linhas de Transmissão**

Os principais fatores de faltas em linhas de transmissão são as solicitações extremas de tensão e corrente também chamadas de sobretensões e sobrecorrentes.

As sobretensões são definidas em [6] como tensões transitórias, variáveis com o tempo, cujo valor máximo é superior ao valor de crista das tensões máximas de operação do sistema.

As sobretensões podem ser geradas por efeitos externos ao sistema ou pelo próprio sistema elétrico. As causas externas mais comuns são as descargas atmosféricas. Já as causas internas são manobras de modo geral.

Não é possível evitar que descargas atmosféricas ocorram em linhas de transmissão, pois estas são um fenômeno aleatório, mas é possível minimizar o efeito destas através do uso de condutores aterrados nas estruturas das torres, estes são chamados de cabos pára-raios.

Falhas internas em linhas de transmissão podem ocorrer devido à abertura ou fechamento de disjuntores, em situações como: i) Energização e religamento de linhas; ii) Manobras de cargas indutivas e capacitivas; iii) Ocorrência e eliminação de faltas; iv) Ressonância linear e ferrorressonância; v) Ressonância subsíncrona; vi) Religamento monopolar; vii) Rejeição de carga e viii) Tensão de restabelecimento transitória.

#### **1.4.1. Sobretensões Atmosféricas:**

As sobretensões atmosféricas são sobretensões fase/terra ou entre duas fases, em um dado ponto do sistema, devido a uma descarga atmosférica. A incidência da descarga pode ocorrer diretamente sobre o equipamento (subestação), sobre as linhas de transmissão ou também de forma indireta, por indução.

Sobretensões atmosféricas usualmente são suficientemente elevadas para provocar falhas nos isolamentos, ocasionando, conseqüentemente, falha e perda de continuidade.

#### **1.4.2. Sobretensões de Manobra:**

Estas ocorrem sempre que há mudança na topologia do sistema. A causa dessa mudança pode ter sido programada como ligamento e desligamento de cargas, como a ocorrência ou eliminação de faltas.

Observa-se que cerca de 1% das falhas que ocorrem em sistemas de transmissão devem-se à sobretensões de manobra [7].

Tanto a ocorrência como a eliminação de faltas causam sobretensões no sistema. A falta fase/terra é mais freqüente e por isso procura-se evitar que esta cause faltas envolvendo outras fases do sistema ou contribua para a geração de faltas em outras linhas, [6].

A sobretensão gerada por uma falta fase/terra depende do tipo de aterramento do sistema. Um sistema solidamente aterrado, em geral, não possibilita falhas nas fases não afetadas, uma vez que o neutro do sistema continua no potencial de terra. Já para um sistema isolado ao ocorrer uma falta fase/terra, esta causará uma sobretensão transitória nas outras fases, que pode chegar, na pior das situações a 2,73 p.u. (por unidade, número de unidades do valor nominal de operação).

### **1.4.3. Sobrecorrentes:**

As sobrecorrentes podem ser definidas como correntes transitórias, variáveis com o tempo, cujo valor máximo é superior ao valor de crista da corrente máxima em operação no sistema.

As sobrecorrentes são usualmente causadas por eventos como energização de transformadores, reatores, e de banco de capacitores.

A energização de transformadores pode gerar altas correntes transitórias de magnetização, que atingem até 10 vezes o valor de corrente nominal. As correntes transitórias, por possuírem alto conteúdo harmônico podem gerar sobretensões quando encontram circuitos ressonantes.

A energização de um banco de capacitores provoca distúrbios transitórios oscilatórios, distúrbios estes que podem causar sobretensões que podem alcançar valores de pico fase/terra de 2 p.u.

Observa-se que diferentemente dos fatores que causam sobretensões, os fatores ou eventos causadores de sobrecorrentes são programados e, portanto raramente têm um caráter não-probabilístico.

### **1.5. Métodos de Localização de Falhas.**

A localização de faltas em linhas de transmissão é um assunto amplamente discutido na literatura há anos. Existem vários métodos bem sucedidos para a localização de faltas, dentre estes existem duas abordagens predominantes, [3].

A primeira abordagem é constituída por métodos baseados na determinação da impedância aparente da linha de transmissão no momento da falta. Esses métodos utilizam dados das componentes fundamentais de tensão e corrente de uma, duas ou três extremidades.

A segunda abordagem é formada por métodos de ondas viajantes. Estes se baseiam em transitórios de alta frequência originados durante a evolução da falta sobre a linha de transmissão.

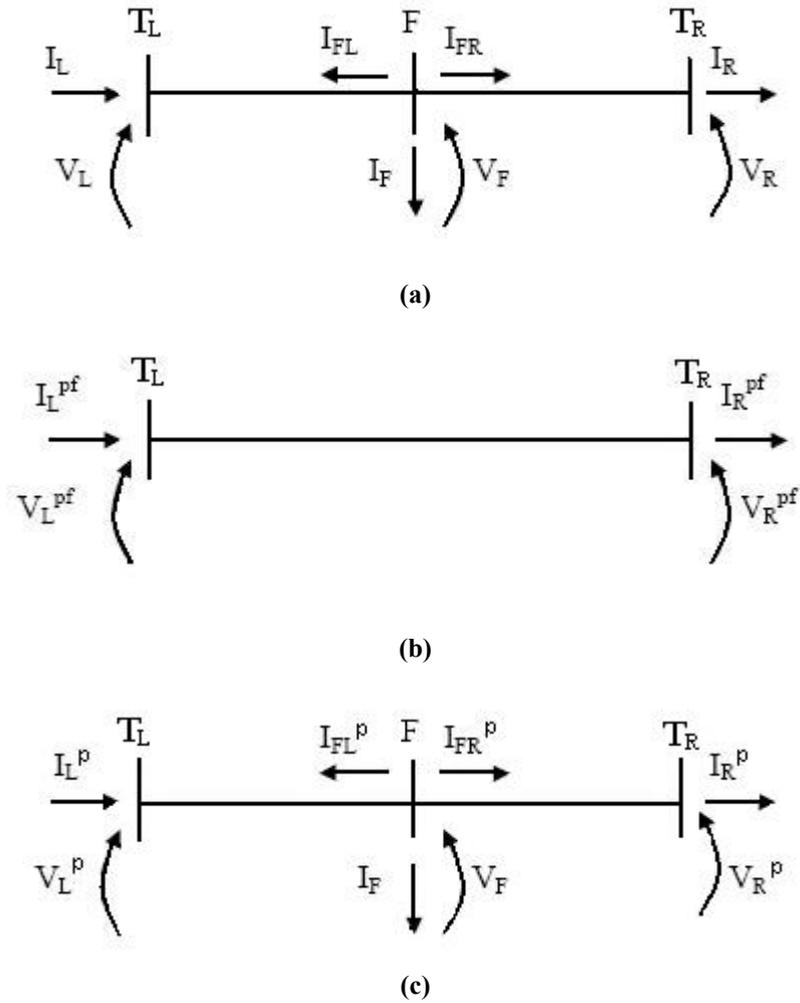
Além destas duas idéias iniciais, existem inúmeras variações destas, e mais recentemente pode-se encontrar novas abordagens para o problema de localização de faltas. Estas últimas utilizam predominantemente novos paradigmas da computação como as Redes Neurais Artificiais (RNAs) e novos conceitos de filtros como a Transformada Wavelet (TW). Mais detalhes serão tratados adiante.

Nos próximos subitens serão mostrados os principais métodos de localização de faltas em linhas de transmissão, em ordem cronológica, das duas abordagens acima citadas.

### **1.5.1. Métodos de Localização de Faltas Utilizando Dados de Um Terminal.**

Estes métodos utilizam simplificações para estimar a localização da falta a partir da impedância aparente durante a falta, observada em apenas um terminal. A modelagem da linha de transmissão é geralmente feita considerando parâmetros concentrados, os sistemas elétricos vizinhos são representados por equivalentes Thévenin. É necessário que estejam disponíveis fasores de corrente e tensão pré e pós-falta de cada fase da linha para que sejam minimizados os erros causados pelas hipóteses simplificadoras.

➤ O método apresentado por Takagi et al em [8] é um algoritmo de localização de falta utilizando dados de tensão e corrente de apenas um terminal. Estes fasores são filtrados através da técnica de Transformada Discreta de Fourier (TDF) para obtê-los em regime permanente. Nesta técnica é considerado o princípio de superposição nas linhas, fazendo uma separação da linha faltosa em uma pré-falta e uma falta-pura, no equacionamento deste método assumiu-se uma linha monofásica e um ponto de falta F, figura 1.5.



**Figura 1.5** – (a) Linha em situação de falta; (b) Linha em situação de pré-falta; (c) Linha em situação de falta-pura.

Da figura 1.5 observa-se que:

$$V_F = R_F I_F \quad (1.1)$$

$$I_F = -(I_{FL}^p + I_{FR}^p) \quad (1.2)$$

Sendo  $V_F$  e  $I_F$  tensão e corrente no ponto de falta respectivamente;  $R_F$  a resistência da falta;  $I_{FL}^p$  a componente da corrente de falta que flui para do ponto de falta para o terminal local;  $I_{FR}^p$  a componente da corrente de falta que flui do ponto de falta para o terminal remoto, ambas definidas para uma falta-pura.

Define-se  $K(d)$  como a razão das correntes de falta, sendo  $d$  a distância da falta ao terminal local, ou ainda:

$$K(d) = \frac{I_{FR}^p}{I_{FL}^p} \quad (1.3)$$

Usando (1.3) em (1.2) chega-se a:

$$I_F = -K(d)I_{FL}^p - I_{FL}^p \quad (1.4)$$

A equação (1.4) aplicada em (1.1) fornece:

$$V_F = -R_F I_{FL}^p (1 + K(d)) \quad (1.5)$$

Para a determinação dos valores de  $V_F$  e  $I_{FL}^p$  utilizam-se os dados do terminal local com representação através de quadripólos.

$$V_F = A(d)V_L - B(d)I_L \quad (1.6)$$

$$I_{FL}^p = C(d)V_L^p - D(d)I_L^p \quad (1.7)$$

Sendo  $V_L$  e  $I_L$  tensão e corrente de pré-falta no terminal local e  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  constantes do quadripólo representativo da linha dados por:

$$A(d) = \cosh(\gamma d)$$

$$B(d) = Z_c \sinh(\gamma d)$$

$$C(d) = Z_c^{-1} \sinh(\gamma d)$$

$$D(d) = A(d)$$

Usando as equações (1.6) e (1.7) em (1.5), tem-se:

$$A(d)V_L - B(d)I_L = -R_F (C(d)V_L^p - D(d)I_L^p) (1 + K(d)) \quad (1.8)$$

Que pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{A(d)V_L - B(d)I_L}{C(d)V_L^p - D(d)I_L^p} = -R_F(1 + K(d)) \quad (1.9)$$

São consideradas as seguintes hipóteses para a equação (1.9):

- A  $R_F$  (resistência da falta) é puramente resistiva.
- A relação  $K(d)$  é um número real.

Deste modo a equação (1.9) possuirá apenas parte real e, portanto:

$$\text{Im}\left(\frac{A(d)V_L - B(d)I_L}{C(d)V_L^p - D(d)I_L^p}\right) = 0 \quad (1.10)$$

A equação (1.10) pode ser resolvida utilizando algum método iterativo como, por exemplo, o Newton-Raphson.

É fácil observar que (1.10) possui apenas uma variável desconhecida,  $d$ , isto permite que os valores sejam obtidos de qualquer dos terminais. Além disso, (1.10) não depende da resistência da falta, o que torna o método independente desta.

Para falta fase/terra a expressão para o cálculo da distância de falta utiliza dados das seqüências zero, positiva e negativa, representadas respectivamente pelos índices 0, 1 e 2.

$$\text{Im}\left(\frac{V_F^0 + V_F^1 + V_F^2}{C^j(d)V_L^{jf} - D^j(d)I_L^{jf}}\right) = 0 \quad (1.11)$$

$$V_F^0 + V_F^1 + V_F^2 = 3R_F I_F^j \quad (1.12)$$

Para a falta dupla-fase utiliza-se:

$$\text{Im}\left(\frac{V_F^1 - V_F^2}{C^j(d)V_L^{jf} - D^j(d)I_L^{jf}}\right) = 0 \quad (1.13)$$

$$V_F^1 - V_F^2 = R_F I_F^j \quad (1.14)$$

E para dupla fase/terra tem-se:

$$\text{Im}\left(\frac{V_F^1 - V_F^0}{C^0(d)V_L^{0f} - D^0(d)I_L^{0f}}\right) = 0 \quad (1.15)$$

$$V_F^1 - V_F^0 = -3R_F I_F^0 \quad (1.16)$$

➤ O método apresentado por Takagi et al em [9] é uma continuação de [8]. A diferença está no tipo de filtragem, em [9] é utilizada Transformada de Laplace para resolver o problema de localização da falta. O método utiliza basicamente as mesmas considerações feitas em [8], e devido a equação principal não ser linear também torna-se necessária uma técnica de solução iterativa. Nos dois casos apresentados por Takagi et al é essencial a utilização de técnicas de filtragem devido à distorção harmônica existente nas ondas de tensão e corrente após a falta.

➤ Takagi et al, em [10], apresentam o desenvolvimento de um aparelho digital localizador de faltas. Tal aparelho utiliza os princípios apresentados em [8] e [9]. As equações básicas do equipamento são as equações (1.6) e (1.7). São adotadas as seguintes aproximações:

- Considera uma linha de transmissão suficientemente curta, isto é,  $\text{tgh}(\gamma d) = \gamma d$ .
- Os ângulos (argumentos) da corrente de falta  $I_L$  e  $I_L^p$  são ângulos iguais.

O localizador desenvolvido pode monitorar até duas linhas de transmissão simultaneamente. Quando ocorre uma falta, o valor da distância calculada aparece no display do equipamento. Além disto, dados como a fase faltosa, tensão e corrente de pré e pós-falta são impressos pelo aparelho.

➤ Uma outra técnica de localização de faltas é apresentada por Richards e Tan na referencia [11]. Nesta a localização de falta é feita por estimação de parâmetros de um sistema dinâmico. O método foi equacionado para uma LT com alimentação nos dois terminais, mas utiliza dados de apenas um dos terminais.

O sistema de equações diferenciais no modelo de Richards e Tan foi feito admitindo o modelo de parâmetros concentrados para a linha. São utilizados equivalentes Thévenin para transitórios nos dois terminais. O sistema de equações diferenciais é simplificado pela utilização de componentes simétricos. O algoritmo não exige filtragem para componentes de corrente contínua nem de alta frequência. Este método fornece não só a distância da falta, mas também a resistência desta.

➤ Eriksson et al apresentam em [12] um aparelho localizador de faltas que utiliza técnicas de compensação para aumentar a precisão da localização da falta. Nesta técnica são utilizados dados das componentes fundamentais de tensão e corrente de apenas um dos terminais da LT, para isto utiliza filtros CA do sistema de proteção da LT. A principal inovação é a consideração da influência do outro terminal através da utilização do modelo completo da LT.

O localizador fornece a distância da falta em percentagem do comprimento total da LT, além disso mostra pontos críticos ou faltas transitórias na linha, pontos estes que podem tornar-se uma falta permanente.

### **1.5.2. Métodos de Localização de Falta Utilizando Dados de Dois e Três Terminais.**

Este método é essencialmente similar ao caso anterior. A principal diferença consiste no fato de que estes métodos são capazes de minimizar ou mesmo eliminar os efeitos indesejáveis presentes nos métodos de um terminal; isso fornece um aumento de precisão no algoritmo e conseqüentemente um aumento de confiabilidade do método. Estes métodos

geralmente independem da impedância de falta e das configurações das fontes dos sistemas de potência. Mas é de suma importância que os dados dos dois terminais sejam sincronizados.

Os exemplos mais conhecidos deste método estão descritos nas referências [13] e [14]. Na referência [13] faz-se o equacionamento das tensões no ponto de falta na linha de transmissão com o uso de quadripólos. Na referência [14] utiliza-se a matriz de impedância série da linha de transmissão.

➤ Johns e Jamali em [13] apresentam um método de localização de faltas com dados de dois terminais. Neste os autores visam minimizar erros existentes nos métodos de localização de faltas anteriormente propostos, como erros ocasionados pela assimetria das linhas de transmissão, resistência da falta, capacitância de shunt e conhecimento prévio da impedância da fonte. Para tal, os dados de tensão e corrente obtidos em cada extremidade da linha de transmissão são filtrados para obter os fasores em regime permanente. O equacionamento das tensões no ponto de falta na linha de transmissão é feito através de quadripólos. É importante ressaltar que este método não necessita de identificação do tipo de falta, apresenta-se bastante preciso para linhas não transpostas e o algoritmo é satisfatório em todos os casos testados.

O equacionamento mostrado aqui é apenas para o caso de uma linha com uma fase, porém o trabalho apresentado na referência [13] estende-se para os casos de multi-fases. Usando dados do terminal local, tem-se:

$$V_F = \cosh(\gamma d)V_L - Z_c \sinh(\gamma d)I_L \quad (1.17)$$

Sendo  $V_F$  tensão de falta,  $V_L$  e  $I_L$  os fasores das componentes fundamentais de seqüência positiva no terminal local de tensão e corrente, respectivamente,  $Z_c$  a impedância característica e  $\gamma$  a constante de propagação da linha,  $d$  é a distância do terminal local à falta.

Usando os dados do terminal remoto:

$$V_F = \cosh(\gamma(\ell - d))V_R - Z_c \sinh(\gamma(\ell - d))I_R \quad (1.18)$$

Sendo  $V_R$  e  $I_R$  os fasores das componentes fundamentais de seqüência positiva no terminal remoto de tensão e corrente, respectivamente e  $\ell$  é o comprimento total da linha.

Igualando-se (1.17) e (1.18), e fazendo-se simplificações chega-se na expressão para o cálculo da distância de falta  $d$ :

$$d = \tanh^{-1} \left( \frac{V_L - V_R \cosh(\gamma\ell) + Z_c I_R \sinh(\gamma\ell)}{Z_c I_L - V_R \cosh(\gamma\ell) + Z_c I_R \sinh(\gamma\ell)} \right) \frac{1}{\gamma} \quad (1.19)$$

Se todos os parâmetros da linha de transmissão pudessem ser calculados sem erro o valor da distância  $d$  seria apenas um número real, mas como esta situação é apenas hipotética, o valor da distância apresenta um pequeno valor imaginário o qual é desprezado e admite-se que o valor de  $d$  é a parte real da equação (1.19).

➤ Girgis, Hart e Peterson apresentam em [14] um método de localização de faltas que baseia-se no equacionamento das tensões e correntes na condição de falta, utilizando a matriz de impedância série da linha de transmissão.

As equações básicas deste método fornecem a tensão trifásica no ponto de falta, utilizando dados dos dois terminais da linha.

$$[V_F] = [V_L] - d[Z_{a,b,c}] [I_L] \quad (1.20)$$

$$[V_F] = [V_R] - (\ell - d)[Z_{a,b,c}] [I_R] \quad (1.21)$$

Sendo  $[Z_{a,b,c}]$  a matriz de impedância série da linha e  $[V_L]_p$ ,  $[V_R]_p$ ,  $[I_L]_p$ ,  $[I_R]_p$  os vetores trifásicos de tensão e corrente dos terminais locais e remotos.

Igualando-se as equações (1.20) e (1.21) e reagrupando, tem-se:

$$[V_L] - [V_R] + \ell [Z_{a,b,c}] [I_R] = d [Z_{a,b,c}] ([I_L] + [I_R]) \quad (1.22)$$

Utilizando a equação (1.22) a distância é estimada usando-se o método dos mínimos quadrados:

$$d = (\bar{F}^T F)^{-1} \bar{F}^T L \quad (1.23)$$

Sendo  $\bar{F}^T$  a transposta da matriz F com os elementos conjugados e:

$$L = [V_L] - [V_R] + [Z_{a,b,c}] [I_R] \ell \quad (1.24)$$

$$F = + [Z_{a,b,c}] ([I_L] + [I_R]) \quad (1.25)$$

A referência [13] ainda apresenta um método para dados não sincronizados de duas extremidades e também para dados sincronizados e não sincronizados obtidos em três extremidades.

➤ Aggarwal et al apresentam em [15] um método análogo ao caso com dois terminais equacionado por quadripólos, em [13]. O método apresenta-se insensível à variações na fonte de impedância, na configuração da linha e inclusive na possível transposição desta. Utiliza a teoria da superposição, componentes modais, e a filtragem é feita através da Transformada Discreta de Fourier (TDF). Para uma boa precisão no cálculo da distância da falta o método utiliza-se de dados sincronizados das três extremidades da LT. Uma peculiaridade de método é a pré-classificação do tipo de falta e somente após isto, é feito o cálculo da distância da falta.

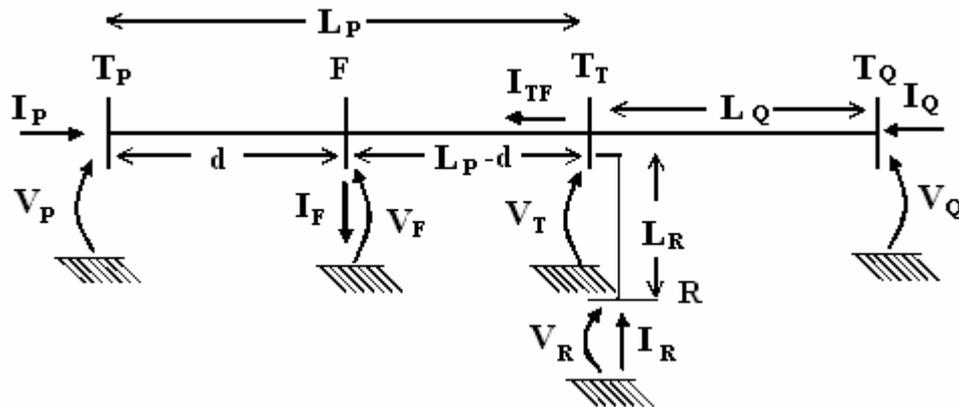
A figura 1.6 ilustra uma LT com três terminais. A distância da falta, para o trecho PT (figura 1.6), é dada pela seguinte expressão:

$$d = \tanh^{-1} \left( \frac{V_P - V_T \cosh(\gamma L_P) + Z_c I_{TP} \sinh(\gamma L_P)}{Z_c I_P - V_T \sinh(\gamma L_P) + Z_c I_{TP} \cosh(\gamma L_P)} \right) \frac{1}{\gamma} \quad (1.26)$$

Onde:

$$I_{TP} = -C(L_Q) V_Q + A(L_Q) I_Q - C(L_R) V_R + A(L_R) I_R \quad (1.27)$$

$$V_T = A(L_Q) I_Q - B(L_R) I_R \quad (1.28)$$



**Figura 1.6** – Representação unifilar de uma LT com três terminais com falta no trecho PT.

Observe que para os outros trechos da linha o equacionamento seria análogo mudando apenas as variáveis.

### 1.5.3. Métodos de Localização de Falhas Baseados na Teoria de Ondas Viajantes

Ondas viajantes em linhas de transmissão são ondas de tensão e corrente que se deslocam em velocidade próxima a da luz. Estas duas ondas estão relacionadas pela impedância de surto da linha de transmissão. Esta relação existe ao longo de toda a linha de transmissão, exceto em suas discontinuidades, terminais e pontos de falta. Nos pontos de descontinuidade ocorre uma superposição de ondas incidentes e refletidas de corrente e tensão. A localização da falta dá-se através do cálculo do tempo necessário para que as ondas encontrem a extremidade ou

descontinuidade da linha sob falta. De posse do tempo e da velocidade (da luz) encontra-se a distância da falta com relação aos terminais.

➤ Gale et al em [16] descrevem quatro tipos diferentes de equipamentos de localização de faltas em LT desenvolvidos na década de 50. Estes quatro tipos são classificados de acordo com seu modo de operação.

No artigo, Gale et al nomenclaturam os equipamentos em A, B, C e D. Os equipamentos A e D utilizam os transitórios viajantes produzidos pela falta para poder localizá-la. Os tipos B e C utilizam um circuito gerador de pulsos para fazerem a localização.

O localizador tipo A utiliza dados de um terminal e mede o tempo de viagem dos transitórios gerados por uma falta entre o ponto de falta e o terminal local.

O localizador tipo D utiliza dados de dois terminais e detecta o tempo de chegada da primeira onda viajante gerada pela falta para a determinação da localização desta. Neste tipo torna-se necessário a sincronização dos dados.

O localizador tipo B também utiliza dados dos dois terminais, mas envia um sinal de sincronização no tempo para os detectores em cada um dos terminais.

O localizador tipo C utiliza o principio de radar, pois utiliza dados de apenas um terminal aplicando um pulso na linha. O tempo de viagem do pulso é utilizado para calcular a distância da falta.

Uma das aplicações mais utilizadas atualmente deste método é feita juntamente com a Transformada Wavelet (TW), como se pode ver na referência [17]. A TW é utilizada para o caso de localização de faltas em sistemas com três terminais, devido à superposição de sinais de chegada.

#### 1.5.4. Métodos de Localização de Faltas Utilizando Redes Neurais Artificiais.

Os métodos de localização de faltas em LTs que utilizam RNAs usualmente utilizam dados de tensão e corrente das três fases de um, dois ou três terminais da linha de transmissão. As RNAs mais utilizadas são as multicamadas e a geração de dados tanto para treinamento como para simulação é feita com o auxílio do software *Alternative Transients Program* (ATP) [18].

É muito presente na literatura, além de métodos de localização de faltas [1, 19, 20, 21, 22], métodos de detecção e classificação de faltas [1] [23].

Detalhes sobre programação de uma RNA, assim como algoritmos de treinamento e topologia destas serão vistos no capítulo 5.

➤ Yang, Chang e Huang apresentam em [19] uma abordagem para a estimação da secção da falta em linhas de transmissão utilizando dados on-line do sistema de proteção e redes neurais artificiais.

Para a criação da RNA foi utilizado um modelo padrão de reconhecimento para identificar diversos tipos de problemas envolvendo combinações de relés e chaves (disjuntores). Foram utilizados alarmes nos relés e chaves para alimentar a RNA e os dados foram coletados através do Controle Supervisório e Aquisição de Dados SCADA (*Supervisory Control and Data Aquisition*). As possíveis faltas são categorizadas de modo que a RNA possa identificar em que secção está a falta através do acionamento dos relés e chaves.

O artigo [19] ainda apresenta um exemplo ilustrativo e alguns testes computacionais para o problema proposto, validando assim o sistema.

➤ Purushothama et al apresentam em [20], uma abordagem utilizando RNAs modificadas para determinação da localização da falta e da resistência de uma falta numa LT.

São utilizados relés de proteção para indicar a linha faltosa e o tipo de falta ocorrida.

Foram criadas duas abordagens para a determinação da localização da falta utilizando RNAs. A primeira abordagem utiliza dados de apenas um dos terminais e utiliza as equações do método teórico de Eriksson et al, [12]. Como dados de entrada são utilizados dados de tensão e corrente das três fases nas situações de pré e pós-falta. Ainda nesta abordagem foram desenvolvidas sete RNAs, uma delas objetiva determinar o tipo de falta e as outras seis objetivam determinar a localização da falta dado o tipo de falta. A segunda abordagem utiliza dados de tensão de sequência positiva das três fases dos dois terminais da LT. Esta abordagem independe dos dados de corrente, do tipo de falta e da resistência da falta.

São apresentadas por Purushothama et al duas topologias distintas de redes neurais, uma delas é feita com a tradicional técnica multicamadas e a outra utiliza a técnica de correlação cascata de Fahlman's [24]. Ambas as redes foram treinadas usando simulações de dados em regime permanente.

O trabalho ainda apresenta diversas simulações onde é observado que as redes neurais que utilizam a técnica de correlação cascata necessitam de um menor número de neurônios para que a convergência seja atingida.

➤ Góes, Rodrigues e Da Silva mostram em [21] uma nova abordagem para a determinação de localização de faltas em LTs com três terminais utilizando redes neurais artificiais. A RNA desenvolvida tem como objetivo identificar o ramo faltoso da LT submetida a uma falta fase/terra.

Para a localização do ramo faltoso são utilizados dados de tensão e corrente trifásicas em apenas um dos terminais, nos outros dois terminais foram utilizados apenas dados de tensão, os dados dos três terminais são necessariamente sincronizados.

Neste trabalho os autores utilizam uma RNA tipo multicamadas atuando como classificadora de parâmetros esta foi desenvolvida em Matlab [25] e a topologia da rede

possui 16 neurônios na primeira camada, 8 na camada intermediária e 3 na camada de saída, portanto é uma RNA 16-8-3. Os dados de simulação foram feitos com o software ATP.

O método apresentou mais de 86% de acerto na identificação do trecho da LT. O método se apresenta restrito, pois apenas identifica o ramo faltoso da LT não faz de fato a localização da falta e faz a identificação apenas para faltas do tipo fase/terra.

➤ Oleskovicz, Coury e Aggarwal apresentam em [1] uma técnica de detecção, classificação e localização da falta em LTs utilizando RNAs classificadoras de padrão. As RNAs foram desenvolvidas com o auxílio do software NeuralWorks [26]. Estas utilizam dados de tensão e correntes trifásicas de pré e pós-falta tanto para o processo de treinamento como para os testes. A geração de dados também foi feita através do software ATP.

Em [1] foram desenvolvidas cinco RNAs distintas destinadas a funções diferentes. Uma delas, com topologia 24-9-2, teve como objetivo apenas detectar a falta. Uma segunda RNA foi utilizada apenas para classificar a falta, admitiram-se 10 tipos distintos de falta, esta tem a seguinte topologia: 24-16-4. As outras três RNAs foram utilizadas para a localização da falta, dependendo do tipo de falta.

Os autores observaram que diversas vezes uma RNA, de modo isolado, não apresentava informações satisfatórias, então decidiram observar o conjunto de RNAs que forneciam detecção, classificação e localização de modo agrupado e obtiveram grande melhora nos resultados.

➤ Ramos, Vellasco e Pacheco apresentam em [22] uma técnica de identificação e localização de faltas em LTs utilizando RNAs e dados de tensão e corrente de apenas um terminal.

No trabalho de Ramos também foram desenvolvidas cinco RNAs. Uma delas é destinada apenas à classificação da falta, as outras quatro RNAs têm como objetivo localizar a falta dependendo do tipo de falta. O trabalho apresenta uma comparação entre um método tradicional de localização de faltas utilizando dados de um terminal, o método de Takagi [10], e o método proposto. Os resultados da comparação são bem encorajadores, pois apresentam uma vantagem na precisão da localização uma vez que o erro absoluto não ultrapassa 2%.

#### **1.5.5. Comentários e Comparações entre os Métodos de Localização de Faltas.**

Os métodos de ondas viajantes têm como vantagens o fato de propiciarem a localização de faltas com alta precisão e de serem independentes dos parâmetros das linhas e da configuração de rede, [3] e [17]. Porém estes métodos carecem de dados provenientes de equipamentos com altas taxas de frequência de aquisição e uma referência de tempo bastante precisa, dedicados exclusivamente a função de localização de faltas, isto torna-os bastante dispendiosos economicamente.

Os métodos de localização de faltas que utilizam dados de terminais são os mais utilizados, pois dependem de dados de tensão e corrente coletados em apenas pontos específicos, as extremidades. Porém a precisão destes métodos é influenciada por fatores como resistência da falta, tipo de falta, distância da falta, variação do módulo da impedância do equivalente e variação da fase da impedância. A referência [2] faz uma comparação aprofundada dos métodos de localização de faltas com dados de um, dois e três terminais, verificando a influência dos fatores separadamente.

Os métodos que utilizam dados de dois terminais têm melhor precisão de algoritmo [3], para casos de sincronização de tempo estes tornam-se invariantes com os fatores acima citados, [2].

Os métodos que utilizam técnicas redes neurais artificiais apresentam bons resultados com relação à precisão e tempo de cálculo após a rede ter sido treinada. Têm como desvantagens o tempo de treinamento da rede, que em geral é muito demorado, e a restrição imposta pelo problema, que em alguns casos, serve apenas para alguns tipos de faltas. Para a generalização do problema, isto é, para localizar a falta qualquer que seja esta é necessário uma outra RNA destinada unicamente a este fim.

## **Conclusão**

Este capítulo teve como objetivo introduzir o leitor aos métodos de localização de faltas em LTs, para tal foram descritos os principais componentes de uma LT; foram abordadas algumas técnicas de manutenção e monitoramento de LTs e foram comentados os principais fatores causadores de falhas em LTs.

Foi apresentado um sucinto estado da arte sobre localização de faltas em LTs, assim como uma breve comparação entre tais métodos.

## CAPÍTULO 2

### MODELOS MATEMÁTICOS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

#### 2.1. Introdução

A introdução de novas fontes geradoras e a interligação dos sistemas de transmissão de energia elétrica tem causado modificações na topologia destes. Tais modificações têm impulsionado, nos últimos anos, o desenvolvimento de vários modelos para linhas de transmissão, isto devido, principalmente, ao aumento da complexidade da malha e o surgimento de fenômenos eletromagnéticos e eletromecânicos atípicos.

O estudo dos transitórios de origem eletromagnética nos sistemas elétricos de potência geralmente utiliza modelos matemáticos a parâmetros distribuídos das linhas de transmissão. Transitórios são funções do tempo e da posição na linha, e são caracterizados pelo tempo de trânsito e impedância de surto, parâmetros estes que são variáveis com a frequência. Daí decorreria, naturalmente, o interesse em se usar a frequência como variável independente no modelamento das linhas de transmissão. No entanto, quase todos os outros aspectos no estudo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência são mais facilmente formulados quando o tempo é a variável independente. São casos típicos de modelos no domínio do tempo as não linearidades envolvendo ramos de magnetização de transformadores, pára-raios, disjuntores, etc. Isto sugere então, o uso integrado de recursos das formulações no domínio da frequência e no domínio do tempo.

As linhas de transmissão podem ser modeladas de muitas formas, dependendo de suas peculiaridades (geometria, isolamento, cabeamento e etc) da precisão e da eficiência requerida. Estas podem ser modeladas quanto à natureza distribuída de seus parâmetros ou quanto à dependência de seus parâmetros com a frequência.

Quanto à natureza distribuída de seus parâmetros, as linhas de transmissão podem ser representadas por:

- **Modelos a parâmetros concentrados:** a linha de transmissão é representada por elementos concentrados, usualmente em uma conexão cascata de seções  $P_i$ , cujos valores são calculados para uma determinada frequência;
- **Modelos a parâmetros distribuídos:** a natureza distribuída dos parâmetros é levada em consideração através do princípio da propagação de ondas. Assim, um distúrbio se propaga sujeito a atenuações até ser refletido nos terminais da linha, existindo um atraso entre tensões (e correntes) em terminais opostos.

Quanto à dependência de seus parâmetros com a frequência, podem ser modeladas por:

- **Modelos a parâmetros constantes na frequência:** a dependência da frequência dos parâmetros da linha é desprezada;
- **Modelos a parâmetros dependentes da frequência:** representam com maior precisão o fenômeno físico da propagação de ondas, pois consideram os efeitos da frequência sobre seus parâmetros.

As linhas de transmissão polifásicas são geralmente modeladas no domínio modal ou no domínio de fases.

- **Modelos no Domínio Modal:** utilizam a técnica da transformação modal de Wedepohl [27]. Esta é feita através do cálculo de autovalores e autovetores das matrizes que caracterizam a linha. A transformação modal possibilita o desacoplamento entre as fases, isto é, numa linha polifásica pode-se separar cada uma das fases tornando-as independentes.

- **Modelos no Domínio de Fases:** determinam o comportamento dinâmico da linha diretamente no domínio de fases, evitando a transição para o domínio modal durante a simulação no tempo. Estes modelos têm despertado muito interesse e têm se mostrado mais precisos que os modelos modais (convencionais).

## 2.2. Breve Histórico

Diversos modelos de linhas de transmissão são estudados e propostos há anos objetivando representar uma linha de transmissão de modo mais preciso e detalhado. Serão aqui comentados alguns trabalhos recentes que apresentam modelos de LT's dependentes da frequência em ordem cronológica.

Martí apresenta em [28] um modelo de linha de transmissão dependente da frequência que é totalmente caracterizado, no domínio da frequência, pela admitância característica  $Y(j\omega)$ , e pelo fator de propagação  $A(j\omega)$ . Neste trabalho é utilizada a matriz de transformação modal.

Castellanos e Martí utilizam em [29] a transformação idempotente ao invés da transformação baseada em autovetores do domínio modal, visando solucionar alguns problemas com o escalonamento das matrizes de transformação modais.

Noda, Nagaoka e Ametani apresentam em [30] um modelo dependente da frequência para o cálculo de transientes diretamente no domínio de fase. Tal modelo evita as convoluções e possíveis instabilidades provenientes da transformação modal. A abordagem substitui as convoluções pelo modelo ARMA (*AutoRegressive Moving Average*), isto traz uma melhoria computacional e compatibilidade com EMTP (*Electromagnetic Transients Program*).

Noda, Nagaoka e Ametani apresentam em [31] melhoramentos do modelo de fase ARMA quanto ao número de iterações, à inicialização de regime-permanente e estabilidade. No intuito de tornar o modelo ARMA mais rápido foi utilizada uma técnica de interpolação linear para alterar os tempos dos intervalos de simulação e conseqüentemente alterarem o número de iterações. Devido a isto, esta modificação do modelo ARMA ficou conhecida como IARMA (*Interpolated ARMA*). Ainda neste trabalho foram propostos dois critérios de estabilidade distintos para a matriz de admitância  $Y(\omega)$  e para matriz de deformação da onda  $H(\omega)$ . Estes critérios asseguram que o modelo se comporte como um circuito passivo e, portanto, um modelo estável.

Castellanos et al. [32], e Marcano e Martí [33] mostram algumas configurações assimétricas e de circuitos múltiplos, em que o modelo idempotente, proposto em [29], produz resultados teoricamente mais precisos que o modelo modal convencional.

Castellanos e Martí [34] criaram uma extensão do modelo clássico de parâmetros distribuídos desenvolvido por Dommel [35] onde a impedância de perdas (resistência e a parte da indutância que varia com a frequência) é representada por uma rede RLs em paralelo e a parcela responsável pela propagação das ondas é modelada por uma linha de transmissão ideal.

Morched et al. apresentam em [36] um modelo de LT aplicável a todas as configurações de linhas, além disto apresenta grande eficiência computacional, mesmo em casos de forte dependência de frequência. Devido a isto foi chamado de modelo universal (Universal Model). Este modelo é independente do intervalo de simulação. Consiste basicamente em tratar a matriz de admitância característica no domínio de fase e tratar a matriz de propagação no domínio modal. A matriz de admitância característica é mais facilmente tratada devido aos seus elementos serem funções suaves. Já a matriz de propagação  $H$  é primeiramente ajustada no domínio modal. Os pólos resultantes e os atrasos resultantes são utilizados para ajustar  $H$  no domínio de fase, assumindo que todos os pólos contribuem para todos os elementos de  $H$ .

Devido a grande complexidade em se trabalhar com a matriz de transformação de dependência da frequência Yu e Martí propuseram em [37] um modelo no qual elimina-se esta e considera-se um modelo híbrido no qual uma parte é uma secção ideal de uma linha de transmissão contendo parâmetros constantes e a outra parte é uma secção com perdas com parâmetros com dependência da frequência.

Fernandes e Neves propuseram em [38] o uso da matriz transformação modal complexa e dependente da frequência, incluído as condutâncias em derivação no cálculo das matrizes de admitância característica,  $Y(\omega)$  e de propagação  $A(\omega)$  em coordenadas de fases.

Fernandes apresentou em [39] uma otimização do modelo universal, onde há um agrupamento de todos os modos existentes em um sistema polifásico, em um único tempo de propagação. Esta aproximação se mostrou precisa, eficiente e numericamente estável.

## **2.3. Modelos Mais Utilizados**

### **2.3.1. Modelo Pi Concentrado**

O modelo Pi é o mais simples para linhas de transmissão. Neste os parâmetros são representados de forma concentrada.

Para fazer uma análise aproximada do comportamento de uma linha de transmissão real é necessário o uso de várias seções em série. Esta análise é bastante satisfatória ao se estudar linhas não transpostas, uma vez que não se faz necessário o uso de aproximações para a matriz de transformação, como usado no caso da linha de parâmetros constantes e distribuídos.

O modelo Pi será descrito no item 2.4 do presente capítulo.

### **2.3.2. Modelagem Modal**

Os modelos modais de linhas de transmissão utilizam uma transformação linear que mapeia um sistema trifásico em três sistemas monofásicos equivalentes denominados modo 0, modo 1 e modo 2. A matriz de transformação modal pode ser obtida a partir de cálculo dos parâmetros de linha. A transformação efetuada tem ainda a propriedade de lançar os efeitos de variação de parâmetros com a frequência devidas aos efeitos de terra na representação do modo 0, gerando os modo 1 e 2 semelhantes a condutores isolados. Com isto cada modo tem a sua velocidade de propagação e comporta-se como se fosse uma linha monofásica, o que torna

esta modelagem especialmente atrativa quando a dependência da frequência da matriz de propagação e da impedância (ou admitância) característica são representados via síntese por funções racionais.

Neste tipo de modelo o cálculo de transitórios nas LT's trifásicas é feito com dados de vetores de tensão e corrente em componentes de fase. A análise é feita pela aplicação da entrada em componentes modais, a linha de transmissão também é modelada em componentes modais. À resposta obtida aplica-se a transformação inversa obtendo-se os resultados em componentes de fase.

Os modelos modais foram implementados em diversos programas tipo EMTP. Estes modelos, da forma que estão implementados hoje, fazem uso de matrizes de transformação reais e constantes na frequência, visando evitar convoluções numéricas nas transições entre os domínios modal e de fases, reduzindo assim o tempo de execução em cálculos de transitórios eletromagnéticos em sistemas polifásicos. São bastante precisos para linhas simétricas [36] e [40], mas se mostram limitados para linhas assimétricas, com circuitos múltiplos e cabos subterrâneos, pois nestes casos a matriz transformação modal pode se mostrar bastante dependente da frequência [41]. Os elementos da matriz transformação podem ser aproximados por funções racionais no plano  $s$ , dando origem a convoluções adicionais durante a simulação no tempo [42] e [43]. Para tanto, estes elementos devem ser contínuos em toda a faixa de frequência sem qualquer descontinuidade.

No domínio da frequência, para uma linha de transmissão com  $n$  condutores, os vetores de tensões  $V(\omega)$  e correntes  $I(\omega)$  terminais, devem obedecer as seguintes equações:

$$\frac{\partial^2 V(\omega)}{\partial x^2} = Z'(\omega) \cdot Y'(\omega) \cdot V(\omega)$$

$$\frac{\partial^2 I(\omega)}{\partial x^2} = Y'(\omega) \cdot Z'(\omega) \cdot I(\omega)$$
(2.1)

em que  $Z'(\omega)$  e  $Y'(\omega)$  são matrizes cheias.

Nos modelos no domínio modal, as  $n$  equações acopladas em (2.1) são transformadas em  $n$  equações desacopladas e resolvidas como se fossem  $n$  linhas monofásicas. Isto pode ser feito através da matriz transformação  $T(\omega)$ , que diagonaliza a matriz produto  $Y'(\omega).Z'(\omega)$  em cada frequência:

$$T^{-1}(\omega) \cdot Y'(\omega) \cdot Z'(\omega) \cdot T(\omega) = \lambda(\omega) \quad (2.2)$$

sendo  $\lambda(\omega)$  a matriz diagonal de autovalores e  $T(\omega)$  a matriz cujas colunas são os autovetores de  $Y'(\omega).Z'(\omega)$ . Assim, usando  $T(\omega)$ , as matrizes diagonais da admitância característica modal  $Y_{\text{mod}}(\omega)$  e do fator de propagação modal  $A_{\text{mod}}(\omega)$  podem ser calculadas.

### 2.3.3. Modelagem no Domínio de Fase

Nos modelos de linhas de transmissão no domínio de fases as simulações são realizadas diretamente em coordenadas de fases e a teoria de autovalores e autovetores, é utilizada apenas como uma ferramenta matemática para calcular  $Y(\omega)$  e  $A(\omega)$ .

A implementação da dependência da frequência da matriz de transformação, necessária para obtenção de um modelo mais preciso, é computacionalmente complicada e pesada, pois pode haver o cruzamento de modos em algumas frequências, o que dificulta um ajuste muito preciso.

Os parâmetros de uma linha aérea polifásica são calculados a partir da geometria da linha e dos dados dos condutores e da resistividade do solo. A resistência  $R'$  (em  $\Omega/\text{km}$ ) e a indutância  $L'$  (em  $\text{H}/\text{km}$ ) são dependentes da frequência, e podem ser calculados a partir dos dados intrínsecos dos condutores, de sua disposição e das características do retorno pelo solo. Já capacitância  $C'$  (em  $\text{F}/\text{km}$ ) é praticamente constante na frequência e depende exclusivamente da geometria da linha.

Para uma linha polifásica pode-se escrever:

$$Z'(\omega) = Z'_{i-int}(\omega) + Z'_{ext}(\omega) + Z'_{solo}(\omega) \quad (2.3)$$

$$Y'(\omega) = Y'_{ext}(\omega) + j \cdot \omega \cdot L'(\omega)$$

sendo:

$Z'(\omega) = R'(\omega) + j \cdot \omega \cdot L'(\omega)$ , a matriz impedância série (em  $\Omega/\text{km}$ );

$Y'(\omega) = G' + j \cdot \omega \cdot C'$ , a matriz admitância em derivação (em  $\text{S}/\text{km}$ );

$Z'_{i-int}(\omega)$  a impedância intrínseca dos condutores;

$Z'_{ext}(\omega)$  a impedância devida à geometria;

$Z'_{solo}(\omega)$  a impedância do retorno pelo solo (todas em  $\Omega/\text{km}$ );

$Y'_{ext}(\omega)$  a admitância devida à geometria (em  $\text{S}/\text{km}$ ).

Diferente dos modelos modais, nos modelos no domínio de fases, a solução de (2.2) é calculada diretamente no domínio de fases:

$$Y(\omega) \cdot V_k(\omega) - I_{km}(\omega) = [Y(\omega) \cdot V_m(\omega) + I_{mk}(\omega)] \cdot A(\omega) \quad (2.4)$$

$$Y(\omega) \cdot V_m(\omega) - I_{mk}(\omega) = [Y(\omega) \cdot V_k(\omega) + I_{km}(\omega)] \cdot A(\omega)$$

sendo:

$$Y(\omega) = \sqrt{Y'(\omega) \cdot Z'(\omega)} \cdot Z'(\omega)^{-1} \quad (2.5)$$

$$A(\omega) = \exp\left(-\sqrt{Y'(\omega) \cdot Z'(\omega)} \cdot \ell\right) \quad (2.6)$$

onde:  $Y_C(\omega)$  e  $A(\omega)$  são as matrizes cheias da admitância característica e o fator de propagação, respectivamente, e  $\ell$  é a extensão da linha de transmissão.

Os termos a esquerda de (2.5) e (2.6) podem ser calculados a partir dos parâmetros modais [37]:

$$Y(\omega) = T(\omega) \cdot Y_{\text{-mod}}(\omega) \cdot T^T(\omega)$$

$$A(\omega) = T(\omega) \cdot A_{\text{mod}}(\omega) \cdot T^{-1}(\omega)$$
(2.7)

Observa-se em (2.7) que uma forte dependência da frequência de  $T(\omega)$  não pode ser aproximada por uma matriz constante sem afetar  $Y(\omega)$  e  $A(\omega)$ .

sendo:  $c_m$  = resíduos da função racional aproximada para o modo  $i$ ;  $p_m$  = pólos da função racional aproximada para o modo  $i$ .

## 2.4. Modelo Utilizado

Buscou-se um modelo matemático que fosse simples, mas que pudesse representar bem uma linha de transmissão. Do modelo escolhido foi feita uma simulação computacional utilizando o software Matlab, mais precisamente o Toolbox Simulink.

O modelo escolhido foi o modelo Pi concentrado, pois apresenta-se satisfatório para o trecho de linha de transmissão em estudo, uma vez que este é um trecho curto e não possui transposições. É importante salientar que apesar de ser um modelo teoricamente simples a simulação feita tem o objetivo de incorporar parâmetros de qualidade de energia através dos dados de entrada de tensão e corrente fornecido pelo analisador *Power Sentinel<sup>TM</sup> 1133A*, descrito no capítulo 3. Outro fator importante é a possibilidade de alteração dos parâmetros da linha segundo modificações ambientais como temperatura, umidade e etc, que podem alterar os valores de resistência e capacitância.

Na figura 2.1 está representada uma linha de transmissão genérica. O equacionamento do modelo será feito com base nesta ilustração.

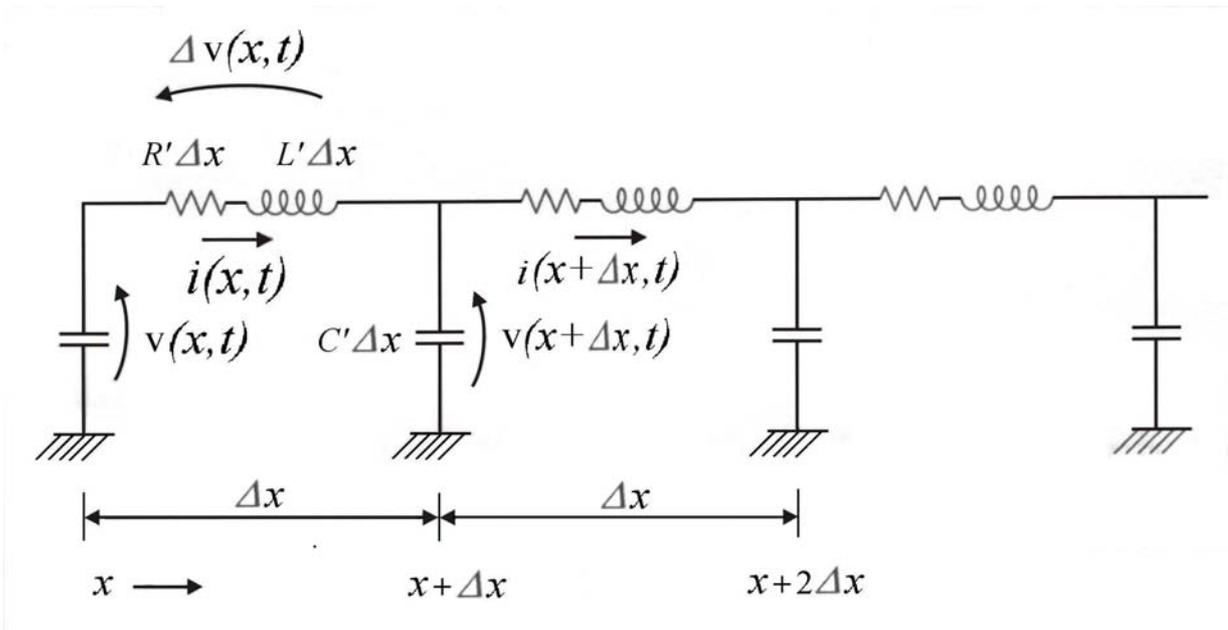


Figura 2. 1 – Linha de transmissão genérica.

Sejam  $R'$ ,  $L'$  e  $C'$  os parâmetros distribuídos de uma LT por unidade de comprimento. Para uma variação de tensão longitudinal  $\Delta v(x,t)$  em um trecho  $\Delta x$ , considerando os parâmetros  $R'\Delta x$ ,  $L'\Delta x$ ,  $C'\Delta x$  concentrados nesse trecho, tem-se:

$$v(x,t) - v(x + \Delta x, t) = R' \Delta x i(x,t) + L' \Delta x \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (2.8)$$

De modo análogo, tem-se para a corrente:

$$i(x,t) - i(x + \Delta x, t) = C' \Delta x \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} \quad (2.9)$$

Aplicando-se a transformada de Laplace, tem-se:

$$V(x,s) - V(x + \Delta x, s) = R' \Delta x I(x,s) + s L' \Delta x I(x,s) \quad (2.10)$$

$$I(x,s) - I(x + \Delta x, s) = s C' \Delta x V(x + \Delta x, s) \quad (2.11)$$

Reescrevendo as equações anteriores e fazendo  $\Delta x \rightarrow 0$ , chega-se a:

$$\frac{\partial V(x,s)}{\partial x} = -(R'+sL')I(x,s) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial I(x,s)}{\partial x} = -sC'V(x,s) \quad (2.13)$$

Derivando novamente e substituído as equações (2.12) e (2.13), chega-se:

$$\frac{\partial^2 V(x,s)}{\partial x^2} = (R'+sL')(sC')V(x,s) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial^2 I(x,s)}{\partial x^2} = (R'+sL')(sC')I(x,s) \quad (2.15)$$

A solução geral das equações (2.14) e (2.15) são:

$$V(x,s) = V^+(0,s)e^{-\gamma(s)x} + V^-(0,s)e^{+\gamma(s)x} \quad (2.16)$$

$$I(x,s) = I^+(0,s)e^{-\gamma(s)x} + I^-(0,s)e^{+\gamma(s)x} \quad (2.17)$$

sendo  $\gamma(s) = \sqrt{(R'+sL')sC'}$  e  $V^+(0,s), V^-(0,s), I^+(0,s), I^-(0,s)$  são as expressões transformadas de funções temporais, conhecidas no ponto  $x=0$ , associadas às ondas progressivas e regressivas.

Considere uma linha de comprimento finito  $\ell$ , em regime permanente senoidal. Substituindo a equação (2.16) na (2.12) e simplificando a notação chega-se a:

$$V(x) = V^+ e^{-\gamma(s)x} + V^- e^{+\gamma(s)x} \quad (2.18)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \left( V^+ e^{-\gamma(s)x} + V^- e^{+\gamma(s)x} \right) \quad (2.19)$$

$$\text{sendo } Z_c(s) = \sqrt{\frac{R'+sL'}{sC'}}.$$

Sejam  $V_1$  e  $I_1$  as tensões e correntes do lado fonte e  $V_2$  e  $I_2$  as tensões e correntes do lado receptor.

No lado fonte como condição de contorno, tem-se:  $V(0) = V_1$  e  $I(0) = I_1$ . Então:

$$V_1 = V^+ + V^- \quad (2.20)$$

$$I_1 = \frac{V^+}{Z_c} - \frac{V^-}{Z_c} \quad (2.21)$$

Facilmente chega-se a:

$$V^+ = \frac{V_1 + Z_c I_1}{2} \quad (2.22)$$

Sabendo que  $V_1 = Z_c I_1$  obtém-se:

$$V^+ = \frac{2V_1}{2} = V_1 \quad (2.23)$$

Analogamente encontra-se  $V^-$ . Reescrevendo (2.18):

$$V(x) = \frac{1}{2} \left[ (V_1 + Z_c I_1) e^{-\gamma x} + (V_1 - Z_c I_1) e^{+\gamma x} \right] \quad (2.24)$$

Reagrupando e fazendo uso das funções hiperbólicas tem-se:

$$V(x) = \cosh(\gamma x) V_s - Z_c \sinh(\gamma x) I_s \quad (2.25)$$

Admitindo, agora, as condições de contorno do lado receptor,  $x = \ell$  tem-se

$V(\ell) = V_2$  e  $I(\ell) = I_2$ . Seguindo o raciocínio anterior obtém-se:

$$I(x) = -\frac{\sinh(\gamma x)}{Z_c} V_1 + \cosh(\gamma x) I_1 \quad (2.26)$$

Colocando as equações (2.25) e (2.26) na forma matricial e fazendo  $x = \ell$ :

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma\ell) & -Z_c \sinh(\gamma\ell) \\ -\frac{\sinh(\gamma\ell)}{Z_c} & \cosh(\gamma\ell) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Invertendo-se a matriz, chega-se a sua forma mais tradicional também conhecida como quadripolo.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma\ell) & Z_c \sinh(\gamma\ell) \\ \frac{\sinh(\gamma\ell)}{Z_c} & \cosh(\gamma\ell) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

## Conclusão

Diversos são os modelos existentes para descrever uma linha de transmissão. A maioria destes descrevem com bastante precisão e fidelidade uma LT, mas requerem um esforço computacional grande. Em geral não incorporam efeitos de transitórios, nem possibilitam a alteração de parâmetros da LT segundo alterações em condições ambientais. Portanto, o modelo escolhido é matematicamente simples, e com o auxílio de poderosos softwares como o Matlab, é possível desenvolvê-lo de modo a incorporar dados reais medidos através do analisador *Power Sentinel 1133A* e propiciar alterações em parâmetros que dependam de condições ambientais.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DE DADOS

#### 3.1. Introdução

As linhas de transmissão são modeladas segundo suas características construtivas, condições de carregamento e segundo a precisão necessária. Os parâmetros de uma linha de transmissão são a sua resistência (R), capacitância (C) e indutância (L).

Para o desenvolvimento de um modelo que descrevesse com precisão a linha em estudo foram necessárias a determinação dos valores dos parâmetros da linha [44] e a obtenção de dados como tensão (V) e corrente (I) das três fases e potências em tempo real.

Acredita-se que através do monitoramento de uma linha de transmissão, obtendo dados sincronizados da decomposição harmônica de tensão e corrente nos dois terminais desta e da utilização de um modelo apropriado e técnicas de Redes Neurais Artificiais, possa-se determinar a localização de uma falha em uma LT.

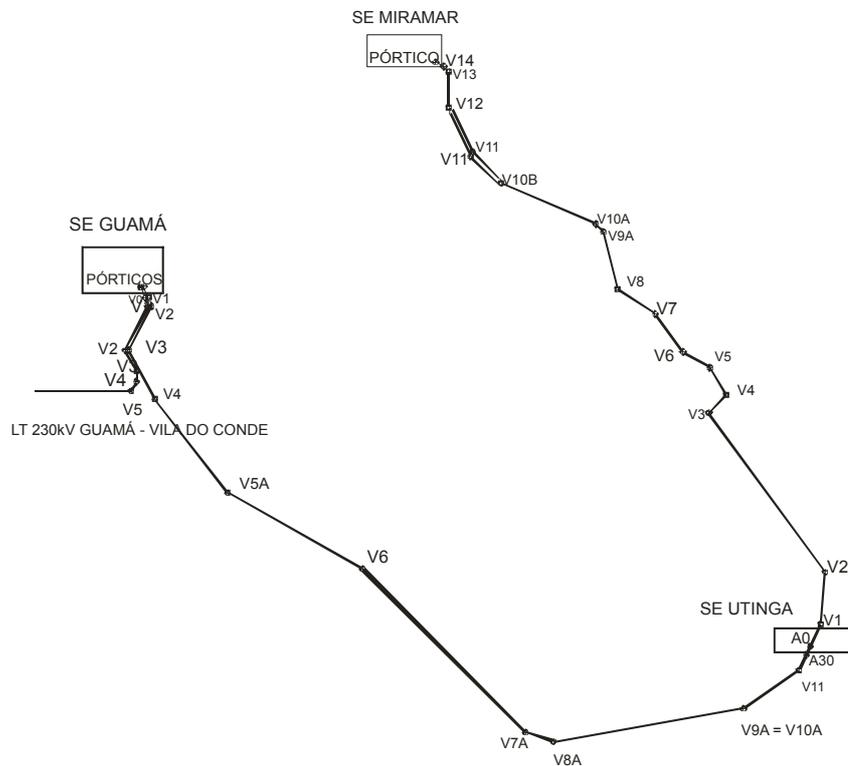
Neste capítulo está descrita a linha de transmissão em estudo, assim como, a metodologia aplicada para a aquisição das grandezas elétricas de um sistema de potência.

#### 3.2. Monitoração de um Linha de Transmissão

A monitoração de uma LT foi apenas o primeiro passo para a determinação da localização de uma falha. A utilidade principal do monitoramento de uma LT é montar um banco de dados com valores medidos de potência, tensão e corrente sincronizados para servir como dados de entrada em uma simulação, para validação do modelo de simulação e como dados de alimentação de uma RNA. Após todo o processo de treinamento de RNA o monitoramento permanente servirá de ferramenta para detectar e localizar uma falta no momento e no lugar de ocorrência.

### 3.3. Escolha da LT para ser monitorada

A linha de transmissão escolhida para monitoração foi a GUAMÁ – UTINGA – MIRAMAR pertencente ao Sistema de Transmissão Tucuruí 230 kV (TUC 86 – 3003R – 5), figura 3.1. Porém o trecho monitorado foi somente entre as subestações (SE) do Guamá e do Utinga, pertencente ao sistema de transmissão das Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE. Trecho este conhecido como Guamá – Utinga.



**Figura 3. 1**– Linha de transmissão GUAMÁ – UTINGA - MIRAMAR pertence a ELETRONORTE.

Os dados construtivos da linha de transmissão como tipos de estruturas das torres, número de vãos, pórticos, distâncias parciais e totais, direção e cota foram obtidos com o auxílio da ELETRONORTE.

No trecho Guamá - Utinga foram encontradas um total de 50 torres, com distância média entre elas de 374,36m, em um percurso total de 19.049,68 m. A tabela 3.1 mostra o plano

traçado do trecho Guamá – Utinga, a tabela 3.2 exibe a distância média entre as torres de um marco ao outro, e a tabela 3.3 exibe o tipo, a quantidade e a numeração das torres no trecho.

**Tabela 3. 1 - Plano de Traçado do Sistema de Transmissão Tucuruí (LT 230 kV), trecho Guamá – Utinga.**

| TORRES  | MARCOS         | DEFLEXÕES   | RUMOS        | DISTÂNCIAS PARCIAIS | DISTÂNCIAS PROGRESSIVAS |
|---------|----------------|-------------|--------------|---------------------|-------------------------|
| PÓRTICO | PÓRTICO        |             |              |                     | 0,00                    |
| 1       | V – 1          | 8°05'19" D  | 67°58'25" NE | 112,60              | 112,60                  |
| 2       | V – 2          | 41°13'35" D | 76°03'45" NE | 98,58               | 211,18                  |
| 5       | V – 3          | 54°56'00" E | 62°42'40" SE | 1.008,46            | 1.219,64                |
| 8       | V – 4          | 10°07'07" E | 62°21'06" NE | 1.121,39            | 2.341,03                |
| 14      | V – 5          | 22°40'11" E | 52°13'59" NE | 2.450,84            | 4.791,87                |
| 22      | V – 6          | 15°46'18" D | 29°33'48" NE | 3.198,44            | 7.981,31                |
| 33      | V – 7A         | 27°45'00" E | 45°20'06" NE | 4.778,27            | 12.759,58               |
| 35      | V – 8A         | 27°20'11" E | 17°25'06" NE | 881,71              | 13.641,29               |
| 45      | V – 9 = V – 10 | 25°03'04" E | 9°54'05" NW  | 3.672,48            | 17.313,77               |
| 49      | V – 11         | 29°59'46" E | 34°57'09" NW | 1.389,76            | 18.702,53               |
| 50      | V – 12         | -           | 64°56'55" NW | 286,92              | 18.989,45               |
| -       | -              | -           | -            | 60,23               | 19.049,68               |
| -       | -              | -           | -            | -                   | -                       |

Fonte: Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE.

**Tabela 3. 2 - Distância média entre as torres do trecho Guamá - Utinga.**

| TORRES  | MARCOS  | Distância Média entre as Torres | TORRES | MARCOS             | Distância Média entre as Torres |
|---------|---------|---------------------------------|--------|--------------------|---------------------------------|
| PÓRTICO | PÓRTICO | 0,00                            | 22     | V – 6              | 398,68                          |
| 1       | V – 1   | 112,6                           | 33     | V – 7 <sup>a</sup> | 434,388                         |
| 2       | V – 2   | 98,58                           | 35     | V – 8 <sup>a</sup> | 440,855                         |
| 5       | V – 3   | 336,153                         | 45     | V – 9 = V – 10     | 367,248                         |
| 8       | V – 4   | 373,796                         | 49     | V – 11             | 347,19                          |
| 14      | V – 5   | 408,473                         | 50     | V – 12             | 286,92                          |

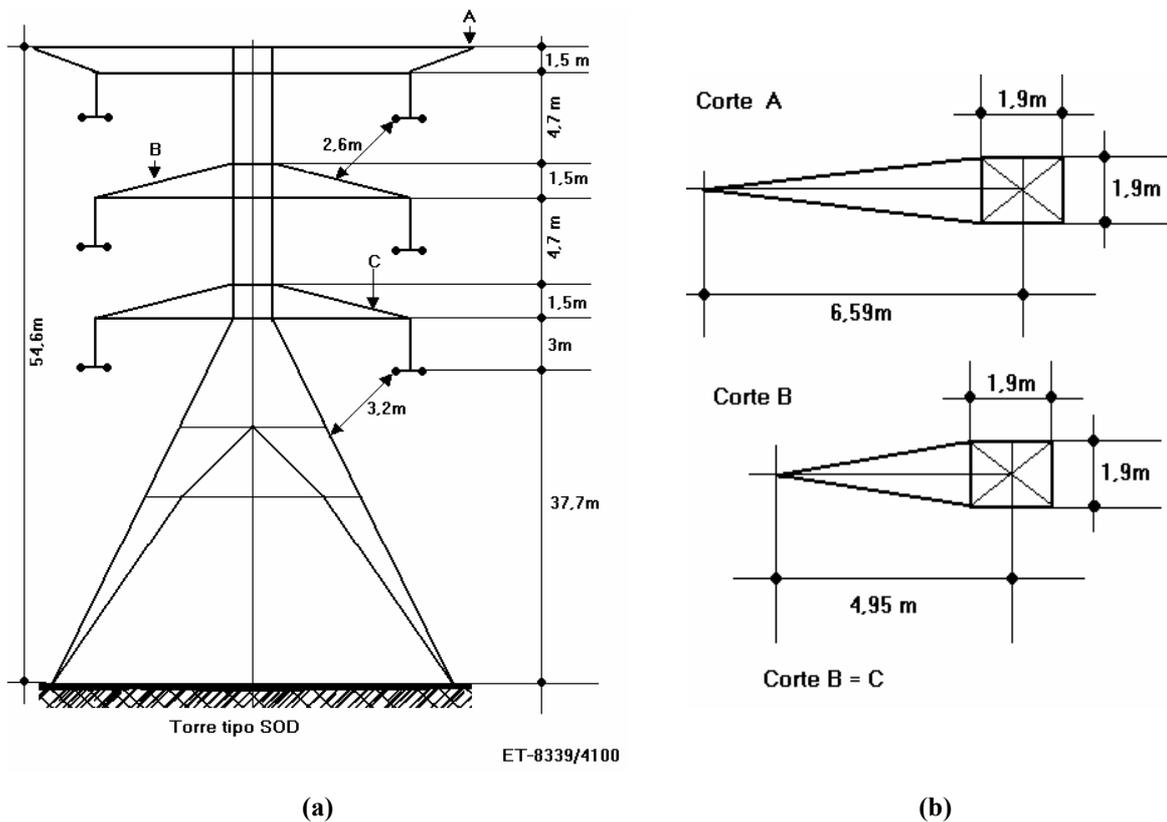
Fonte: Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE.

**Tabela 3.3** - Quantidade e tipo de torres do trecho Guamá - Utinga.

| TIPO    | Nº DAS TORRES                                 | Nº TOTAL DE TORRES DESTE TRECHO |
|---------|---|---------------------------------|
| SOD     | 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 21, 36, 37, 38, 39 | 39                              |
| A30D    | 8, 22   | 7                               |
| A55 FLD | 1, 2, 5, 50                                   | 4                               |

Fonte: Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE.

O tipo de torre mais presente no trecho Guamá-Utinga é a SOD, ilustrada na figura 3.2.



**Figura 3.2** - Torre e distância entre as linhas para a LT/ELETRONORTE tipo SOD– Guamá – Utinga. (a) Vista frontal; (b) detalhe dos braços.

### 3.4. Parâmetros da Linha de Transmissão Escolhida

Correa calcula em [44] os parâmetros R, L, C da linha de transmissão Guamá - Utinga – Miramar.

A resistência foi determinada a partir de dados tabelados. Estes dependem do tipo de material que compõem os cabos da LT. O valor obtido para a resistência foi:

$$R = 0,05751 \Omega/\text{km}$$

A indutância e a capacitância foram calculadas através do modelo matricial, [44]. A indutância é dada pela seguinte equação

$$L = 4,605 \cdot 10^{-4} \log \frac{D_m D_{II}}{D_s D_I} \quad \text{H/km} \quad (3.1)$$

E a capacitância é dada por:

$$C = \frac{0,02412 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{D_m D_{II}}{r D_I}} \quad \text{F/km} \quad (3.2)$$

Sendo:

$D_m$  – Distância média geométrica entre condutores;

$D_I$  - Distância média geométrica entre condutores que conduzem correntes de mesma fase;

$D_{II}$  - Distância média geométrica entre condutores que conduzem correntes de fases diferentes;

$D_s$  – Raio médio geométrico do condutor (dado tabelado);

$r$  – Raio externo;

Portanto os valores de indutância de capacitância por quilômetro, para a LT considerada são:

$$L = 16,7351 \cdot 10^{-4} \text{ H/km}$$

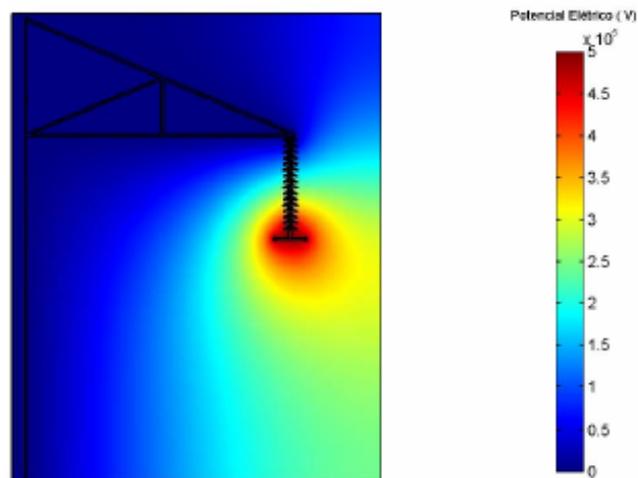
$$C = 6,1296 \text{ nF/km}$$

Considerando o comprimento do trecho Guamá – Utinga se obtém os seguintes valores para os parâmetros da LT em estudo:

- $R = 1,0955 \Omega$
- $L = 31,88 \text{ mH}$
- $C = 116,767 \text{ nF}$

### 3.5. Discussão Sobre o Cálculo da Capacitância

No intuito de obter um valor de capacitância mais próximo do real utilizou-se o Método de Elementos Finitos (MEF) para calcular a capacitância considerando a influência do solo, da estrutura das torres e da cadeia de isoladores como descrito em [45]. O MEF implementado em Matlab apresenta a distribuição do potencial elétrico ao redor da torre, isoladores e cabos, como ilustra a figura 3.3.



**Figura 3. 3** - Distribuição do potencial elétrico em uma cadeia de isoladores próxima à torre da linha de transmissão.

O MEF pôde ser comprovado através de ensaios de tensão aplicada em isoladores de vidro. Os valores obtidos pelo método matricial, pelo de elementos finitos e os dados fornecidos pela ELETRONORTE são comparados na tabela 3.4.

**Tabela 3. 4** – Comparação entre os valores calculados pelos métodos de elementos finitos, matricial e dados reais fornecidos pela ELETRONORTE.

| Dados Calculados |            | Dados Reais |
|------------------|------------|-------------|
| Modelo Matricial | MEF        | ELETRONORTE |
| 83,09 nF/km      | 85,8 pF/km | 78,74 pF/km |

Observa-se que o valor obtido pelo MEF é consideravelmente mais próximo do valor fornecido pela ELETRONORTE. Portanto o valor utilizado no presente trabalho foi:

- $C_{MEF} = 1,634463 \text{ nF}$

### 3.6. Descrição do Equipamento de Monitoração

Para monitorar o trecho escolhido foram utilizados dois equipamentos analisadores *Power Sentinel<sup>TM</sup> 1133A*, cada um instalado em uma subestação.

O *Power Sentinel<sup>TM</sup> 1133A* é um dispositivo elétrico projetado para prover medidas de alta precisão de rendimento e qualidade de energia. Este opera em estações de fornecimento de energia CC/CA. Suas mediadas possuem precisão de 0,025% sob diversas condições, segundo manual de operação [46]. Possui auto-calibração em tempo real, o que elimina muitas fontes de erro. O sinal de calibração passa nos mesmos circuitos de medida como sinais de entrada evitando, assim, acúmulos de valores nos componentes.

O analisador é capaz de obter dados de tensão e corrente das três fases de até 50 harmônicos fornecendo magnitudes e fases. Os dados de energia e potência são medidos a partir dos valores de tensão e corrente. Estes são obtidos através de 20 medições realizadas separadamente por segundo, cada medida usa 1024 exemplares.

O equipamento possui um GPS que permite obter os dados com horários específicos. Além disto, de posse de dois equipamentos, é possível obter dados sincronizados e a partir disto verificar possíveis discrepâncias, como corrente de fuga, ao longo da linha.

Será admitido que os dados fornecidos pelo analisador estão sincronizados para o trecho considerado, pois este possui apenas 20 km e as ondas de tensão e corrente viajam a velocidade da luz, portanto à esta distância, o atraso esta na ordem de  $10^{-5}$ s, o que é irrelevante para o estudo em questão.

### 3.6. Instalação do Analisador

O analisador *Power Sentinel<sup>TM</sup> 1133A* foi instalado nas subestações Guamá e Utinga, figura 3.4. Um desenho esquemático da instalação do *Power Sentinel<sup>TM</sup> 1133A* é mostrado na figura 3.5. O equipamento pode ser configurado através do software PSCSV<sup>TM</sup> fornecido pela

própria ARBITER. Este software envia os dados obtidos pelo 1133A diretamente para um computador, onde estes podem ser armazenados. O circuito de alimentação tanto para o computador como para o 1133A foi de 125 Vcc do quadro, nº de ordem QP-EX2, disponíveis na subestação.



(a)

(b)

Figura 3.4 - Vista da entrada das SEs de (a) Guamá e (b) Utinga

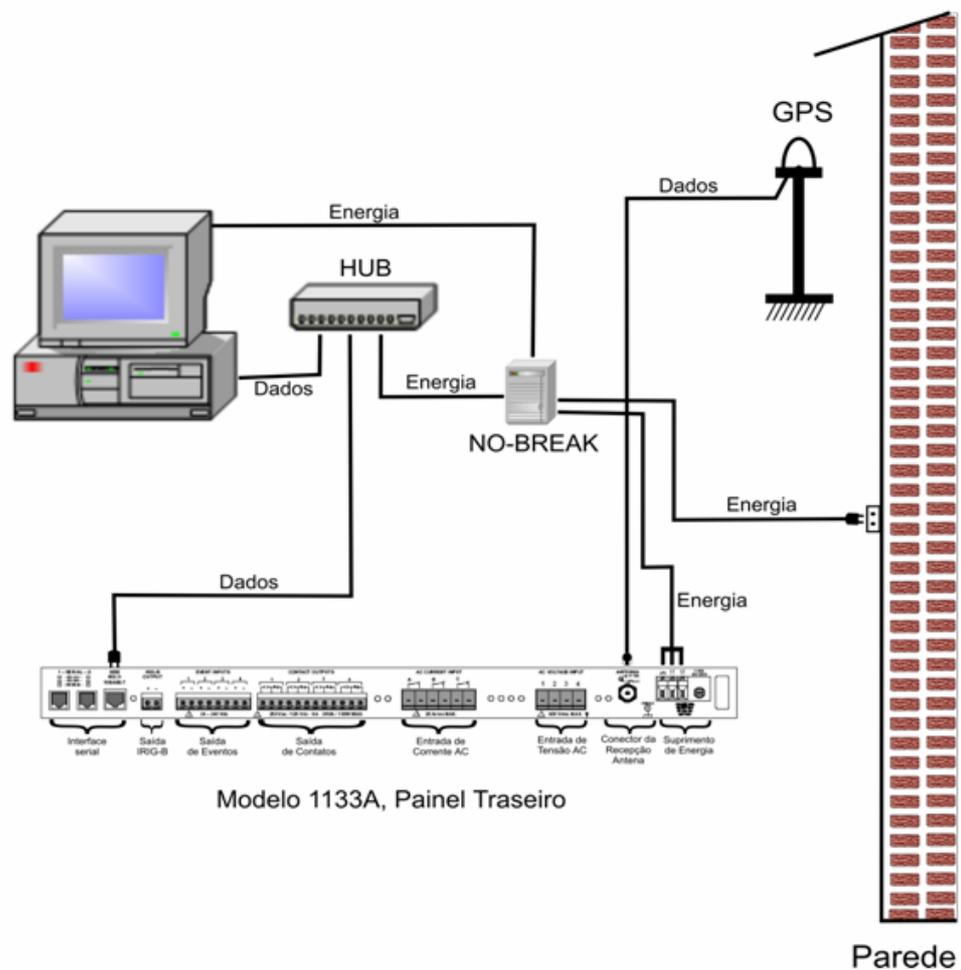
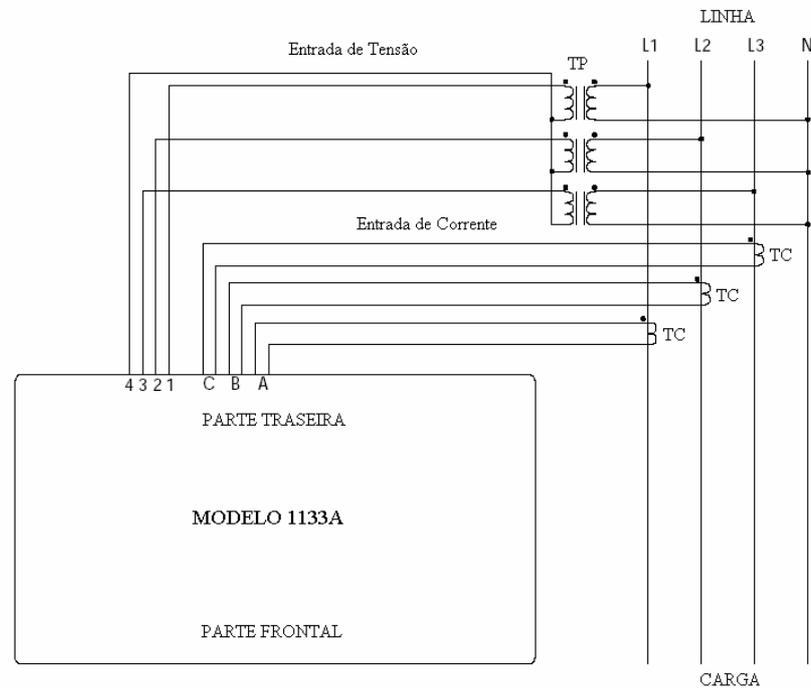


Figura 3.5– Esquemático da ligação do 1133A nas subestações do Guamá e Utinga.

A aquisição de valores de tensão e corrente das três fases foi feita a partir da rede de alta tensão (230 kV) através de TC's (relação 320:1) e TP's (relação 2.000:1) localizado no quadro n° de ordem QP-EX3, conforme mostrado na figura 3.6.



**Figura 3. 6** – Aquisição dos valores de tensão e corrente.

Na figura 3.7 é mostrado o esquemático da ligação através dos circuitos BEI35 (circuito de corrente / proteção primária) e do BEU34 (circuito de tensão) para a aquisição de corrente e tensão, respectivamente, pelo 1133A na SE-Guamá.



Sistema (ONS) necessários para inserção de equipamentos no sistema de energia interligada nacional, a instalação foi iniciada em janeiro de 2004 com sua energização em outubro de 2004. As fotos das figuras 3.9 e 3.10 mostram o local e ligações das instalações na SE Guamá e Utinga, respectivamente.



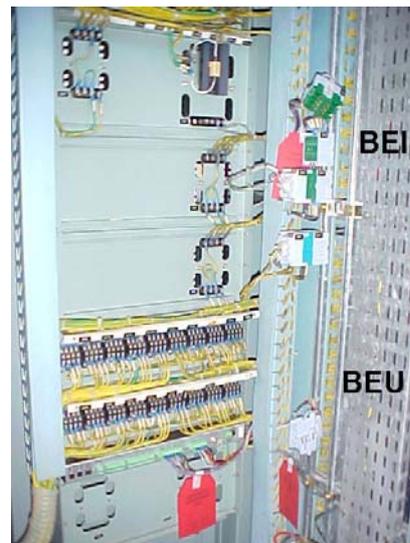
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 3.9** - Aspectos da localização e instalação do medidor na SE-Guamá **(a)** Vista do medidor instalado em painel; **(b)** Vista das ligações no interior do painel; **(c)** Porta traseira do painel aberta para aquisição de dados; **(d)** Aspecto das ligações ao TC e TP, ainda com Cartões de Serviço



(a)



(b)

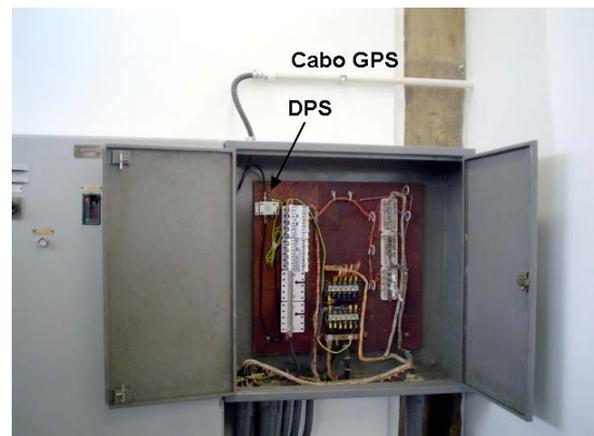
**Figura 3. 10** - Aspectos da localização e instalação do medidor na SE Utinga **(a)** Vista do medidor instalado em painel; **(b)** Vista das ligações no interior do painel.

### 3.7. Instalação do GPS

A instalação do GPS foi feita segundo o modelo existente na casa de Relé 1 da SE-Guamá, conforme mostrado na figura 3.11, e na casa de Relé 2 da SE-Utinga, conforme mostrado na figura 3.12.

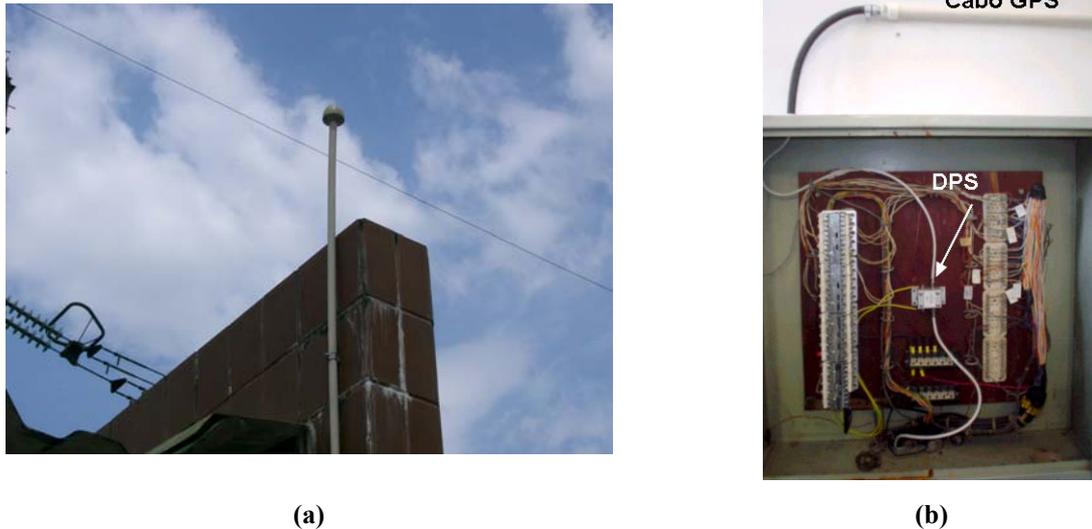


(a)



(b)

**Figura 3. 11** - Instalação do GPS na SE-Guamá **(a)** Vista externa da instalação; **(b)** Instalação da proteção contra descargas atmosféricas.



**Figura 3.12** - Instalação do GPS na SE-Utinga **(a)** Vista externa da instalação; **(b)** Instalação da proteção contra descargas atmosféricas.

### 3.8. Obtenção e Armazenamento dos Dados

Os dados obtidos pelo 1133A são armazenados em microcomputador, para tal foi necessário instalar microcomputador, monitor, nobreak e hub a cada período de leitura. As leituras foram realizadas de setembro de 2005 a maio de 2006.

Cada microcomputador tem uma gravadora de CD o que permitiu armazenar os dados em CD-Rom. Cada CD-Rom tem a capacidade de armazenar 3 dias ininterruptos de leituras de corrente, tensão, potência (ativa, reativa e aparente), fator de potência nas três fases e no total e as componentes harmônicas de tensão e corrente.

A ARBITER fornece um software para armazenar dados em microcomputador denominado *Power Sentinel CSV – PSCSV*. O aspecto da tela pode ser mostrado na figura 3.13.

The screenshot shows the PSCSV software interface with a spreadsheet of data. The columns are: UTC Time, GPS Local Time, Fundamental A V mag, Fundamental A V ph, A V 2 mag, A V 2 ph, A V 3 mag, A V 3 ph, A V 4 mag, A V 4 ph, and A V 5 mag. The data rows show time intervals from 11-17-05 17:00 to 11-17-05 18:00, with corresponding numerical values for each parameter.

Figura 3. 13 - Aspecto da tela de entrada de dados no software PSCSV.

## Conclusão

O presente capítulo mostrou o processo de aquisição de dados. Sendo que os dados de tensão, corrente e potências foram obtidos diretamente através do analisador *Power Sentinel™ 1133A*, já os valores R, L e C de circuito equivalente da LT foram calculados através do modelo matricial com o auxílio de [44] e melhorados através do método de elementos finitos como apresentado em [45].

Os dados acima comentados foram utilizados como dados de entrada do modelo escolhido para simulação, capítulo 2. O tratamento e utilização dos dados está descrito no capítulo 4.

## CAPÍTULO 4

### SIMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

#### 4.1. Introdução

A linha de transmissão em estudo foi modelada, no capítulo 2, através do amplamente conhecido modelo Pi.

Para que a simulação do trecho de linha de transmissão em estudo pudesse incorporar os dados obtidos pelo analisador *Power Sentinel<sup>TM</sup> 1133A* e alterar seus parâmetros constitutivos R, L, C, segundo modificações ambientais foi criado um programa em Matlab (*Toolbox Simulink*) que utiliza as equações básicas do modelo Pi, mais precisamente a equação (2.8).

Observou-se que falhas em trechos diferentes de uma LT acarretam numa decomposição harmônica da corrente de fuga diferente. Portanto acredita-se que dada uma decomposição harmônica da corrente de fuga seja possível determinar a localização de uma falha. Isto será feito com o auxílio de RNAs.

#### 4.2. O Programa de Simulação

O programa foi feito de modo a considerar as entradas de tensão e corrente de 50 harmônicos das três fases fornecidas pelo analisador, e os parâmetros R, L, C da linha, calculados para o trecho em questão. As saídas do programa são tensão e corrente na extremidade remota e a corrente de fuga total do trecho.

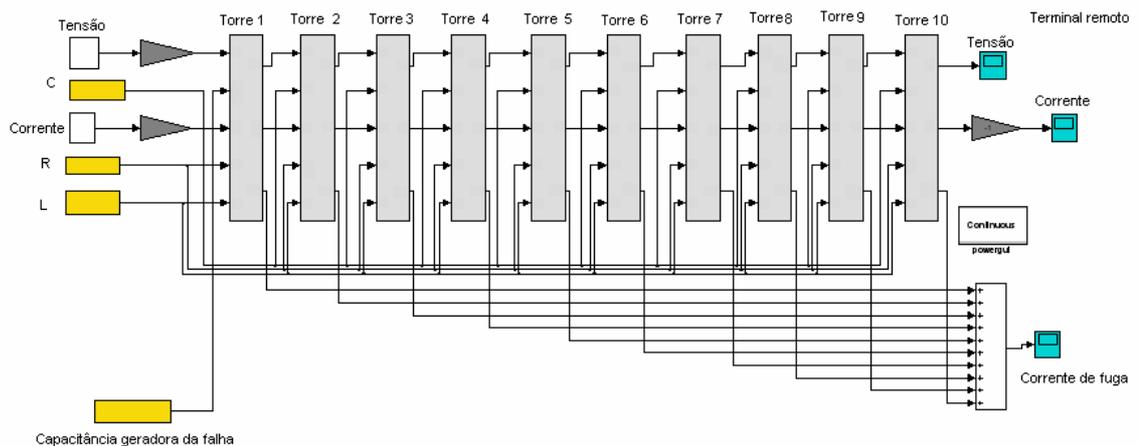
Os parâmetros R, L, C são constantes, mas podem ser facilmente atualizados para contemplar modificações ambientais, ou ainda, para considerar uma outra LT.

Os dados de entrada de tensão e corrente são seis matrizes distintas de  $2 \times 13201$ , onde três são de tensão e três de corrente, cada matriz representando uma fase. A primeira linha da

matriz possui os períodos de tempo e a segunda os módulos de tensão ou corrente. A criação das matrizes será comentada no item 4.4.

A figura 4.1 ilustra o modelo feito em Simulink. Neste observam-se as entradas, valores de tensão e corrente (blocos brancos) e os três parâmetros da linha (blocos amarelos) 10 torres (blocos cinza), descritas como trechos, e a saída que é a corrente de fuga total no trecho em estudo. A figura 4.2 mostra o modelo Pi desenvolvido para cada torre descrito pela equação (2.8). A figura 4.3 mostra a introdução das três fases de tensão e corrente no modelo.

É importante salientar que o modelo necessita de dados de tensão e corrente de apenas um dos terminais da linha. A utilização de dois analisadores, um em cada extremidade, foi necessária unicamente para validar o modelo.



**Figura 4. 1** – Modelo em estudo feito em Simulink.

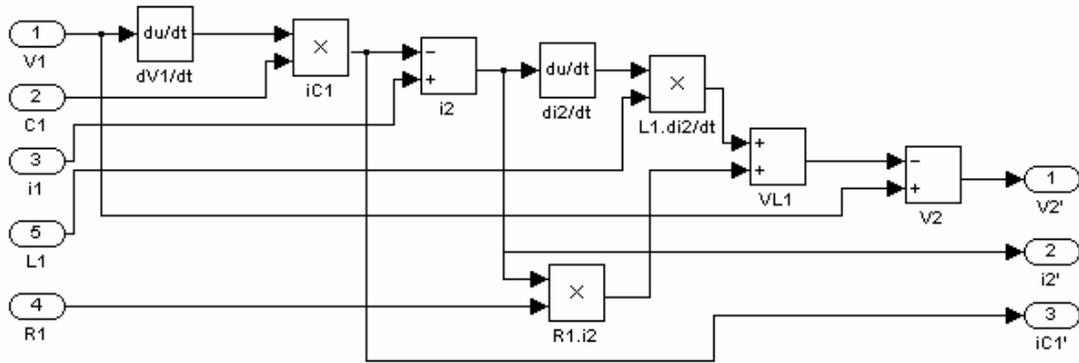


Figura 4. 2 – Modelo Pi desenvolvido para cada torre.

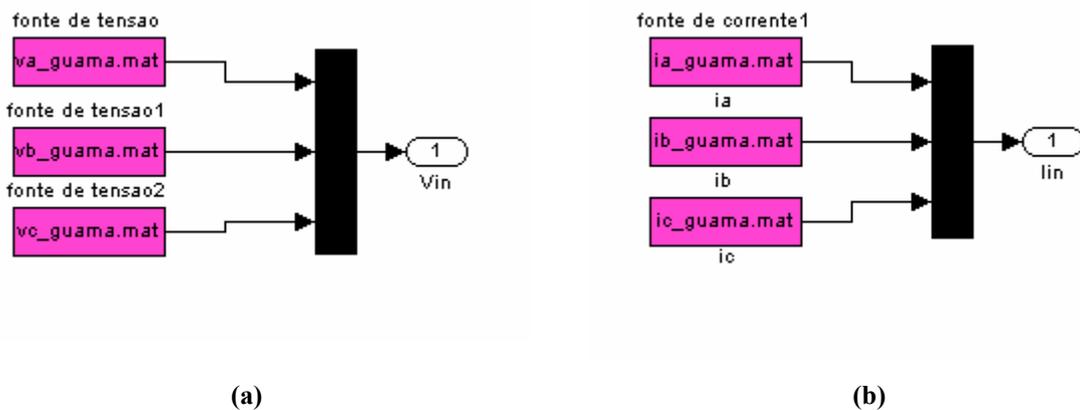
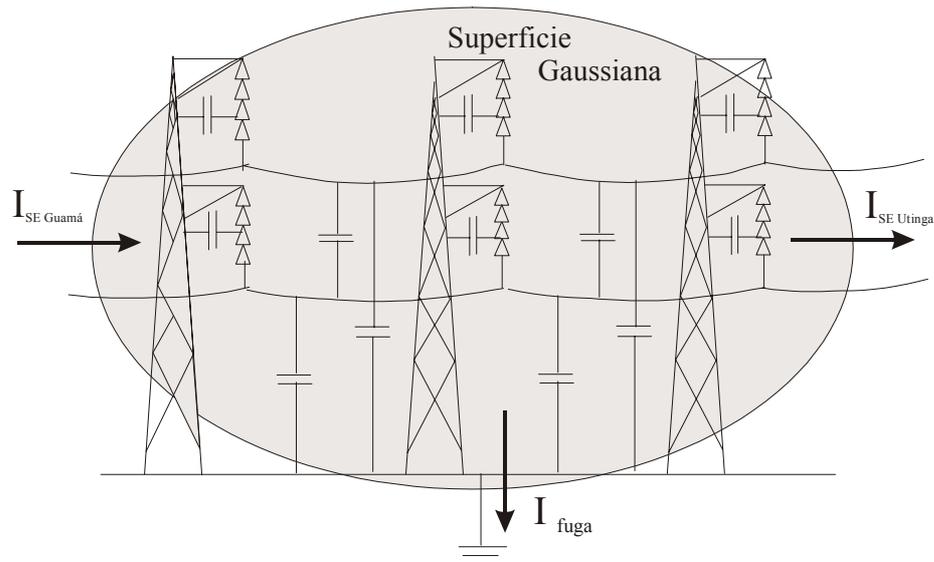


Figura 4. 3 – Introdução das três fases de (a) tensão e (b) corrente.

### 4.3. Obtenção da Corrente de Fuga em uma LT

Parte da validação do modelo desenvolvido está vinculada à teoria das superfícies gaussianas para superfícies fechadas a qual assegura que a soma algébrica das corrente que entram e saem de uma superfície fechada é igual a zero. Aplicando este teorema em um trecho de uma linha de transmissão pode-se obter a corrente de fuga desta linha, como sugerido pela figura 4.4.

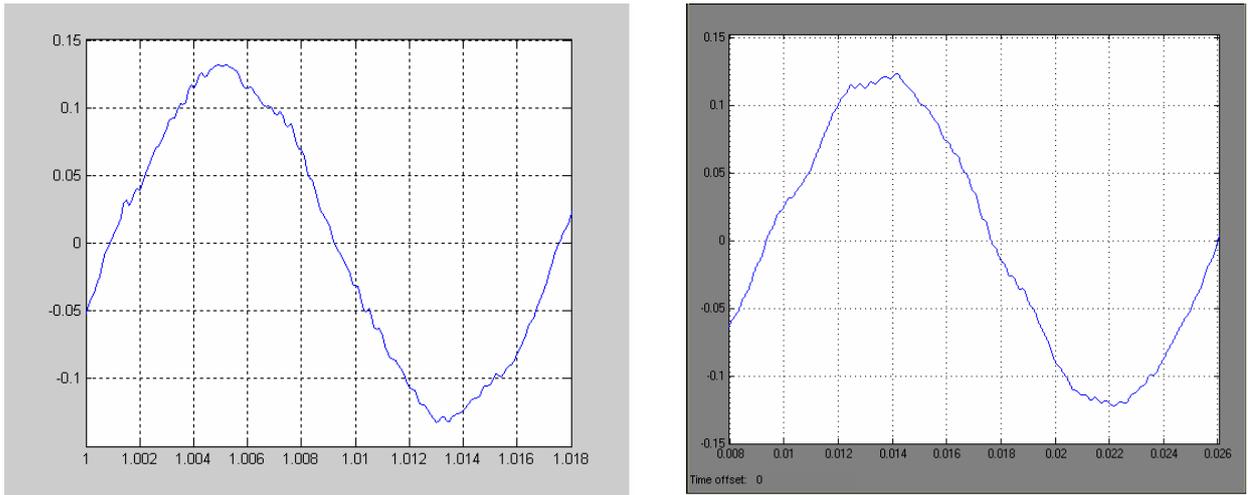


**Figura 4.4** – Aplicação do teorema de Gauss para superfícies fechadas para um trecho de linha de transmissão.

Com os analisadores *Power Sentinel<sup>TM</sup> 1133A* sincronizados instalados nas subestações de Guamá e Utinga, obtendo valores da decomposição harmônica de corrente, pôde-se obter, experimentalmente, a corrente de fuga de acordo com a equação 4.1.

$$I_{Fuga} = I_{SE\ Guama} - I_{SE\ Utinga} \quad (4.1)$$

Para validar o modelo utilizado foi feita uma rotina baseada na idéia do teorema das superfícies fechadas, de modo que esta forneça a corrente de fuga a partir da subtração dos dados reais da corrente de fase A da SE Guamá (50 harmônicos) pela da SE Utinga (50 harmônicos), Apêndice A. A figura 4.5a ilustra a corrente de fuga gerada pela rotina. A corrente de fuga para as três fases fornecidas pelo modelo Pi desenvolvido está ilustrada na figura 4.5b.



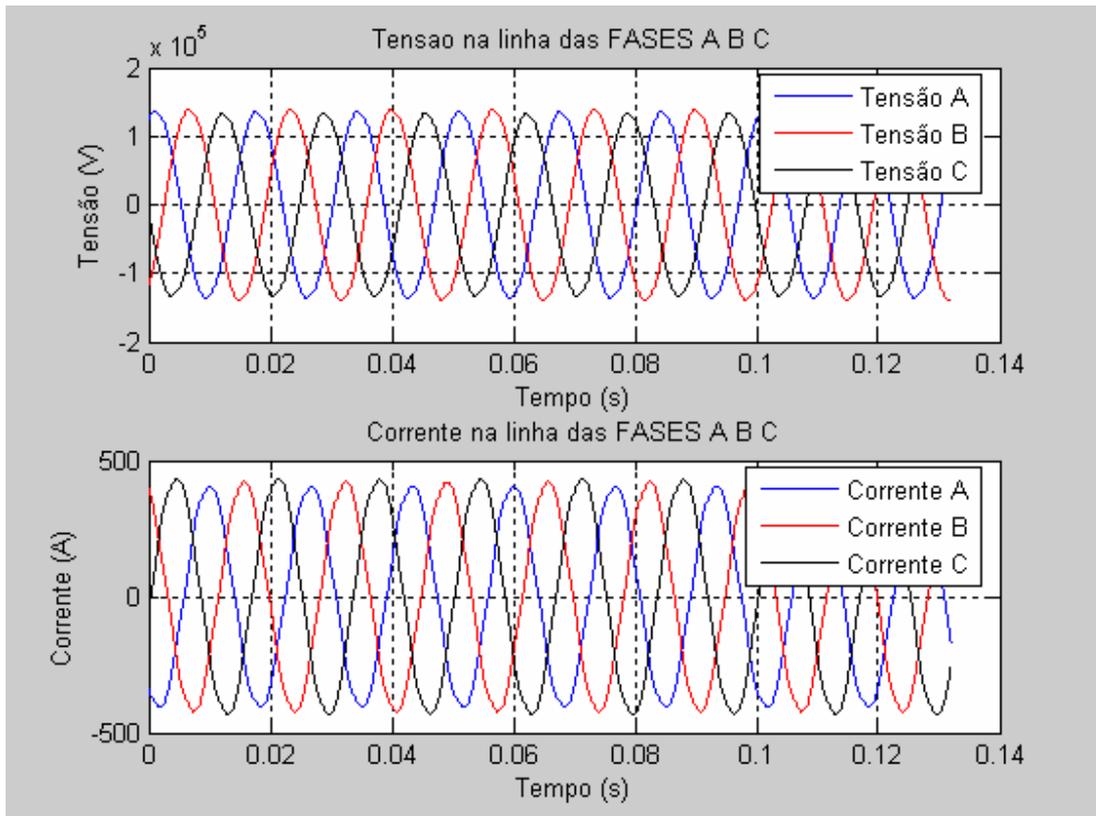
**Figura 4.5** – Corrente de fuga gerada **(a)** pela rotina feita utilizando a teoria de superfícies fechadas; **(b)** o modelo Pi desenvolvido.

Observa-se que as duas formas de onda estão na mesma ordem de grandeza, ou melhor, têm seus valores de pico quase iguais, e além disto possuem formas de onda bastante parecidas.

É com base nestas semelhanças que admite-se que o modelo fornecerá espectros harmônicos da corrente de fuga próximos aos reais. Portanto considera-se o modelo válido para o propósito em questão.

#### 4.4. Metodologia Empregada na Simulação

Primeiramente tomou-se uma única linha de dados fornecida pelo analisador, isto é, tomou-se apenas um instante de tempo. Estes dados, tensão e corrente (contendo harmônicos até a 50ª ordem), foram armazenados num arquivo texto. Após o armazenamento, fez-se necessário uma pequena rotina para organizar e transformar os dados numéricos em uma forma de onda, como mostra a figura 4.6, a rotina pode ser vista no Apêndice B. Estas formas de onda, de tensão e corrente, são os dados com extensão *.mat* que são as entradas do modelo feito em Simulink.



**Figura 4.6** – Formas de onda das três fases de tensão e corrente obtidas a partir de dados numéricos de 50 harmônicos.

Para que se pudesse ter um conjunto de dados que representasse diversos tipos de falhas e em diversos locais, foram geradas falhas através da alteração do valor da capacitância em uma determinada torre, e as demais permaneciam inalteradas. Pois sabe-se que uma falha devido a problemas em cabos ou na isolação acarreta uma alteração no valor da capacitância [44].

Foram simuladas falhas em todas as torres com quatro valores de capacitância distintos além do valor de condição normal de funcionamento da linha, o que totalizou 41 arquivos de saída. Os valores de capacitância para a criação das falhas foram obtidos através de um espaçamento logarítmico entre o valor normal de funcionamento e oito vezes este valor. Tais valores são:

$$C_0 = 1,634463 \times 10^{-10} \text{ F} \quad (\text{condição normal de funcionamento})$$

$$C_1 = 2,7488 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$C_2 = 4,6230 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$C_3 = 7,7749 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$C_4 = 13,0757 \times 10^{-10} \text{ F}$$

Os valores de capacitância foram criados de modo que houvesse uma diferença sensível entre as correntes de fuga produzidas por estas capacitâncias. Não estão disponíveis valores experimentais de capacitância que descrevem uma condição de falha, uma vez que os medidores da ELETRONORTE são sensíveis a variações de indutância na linha.

A saída do programa, isto é a decomposição harmônica da corrente de fuga total, pode ser fornecida através da função interna do Matlab a Powergui em forma de diagrama de barras, forma de onda ou em lista; optou-se pela saída em forma de lista, figura 4.7. Cada saída (decomposição harmônica) foi guardada num arquivo texto, Apêndice C.

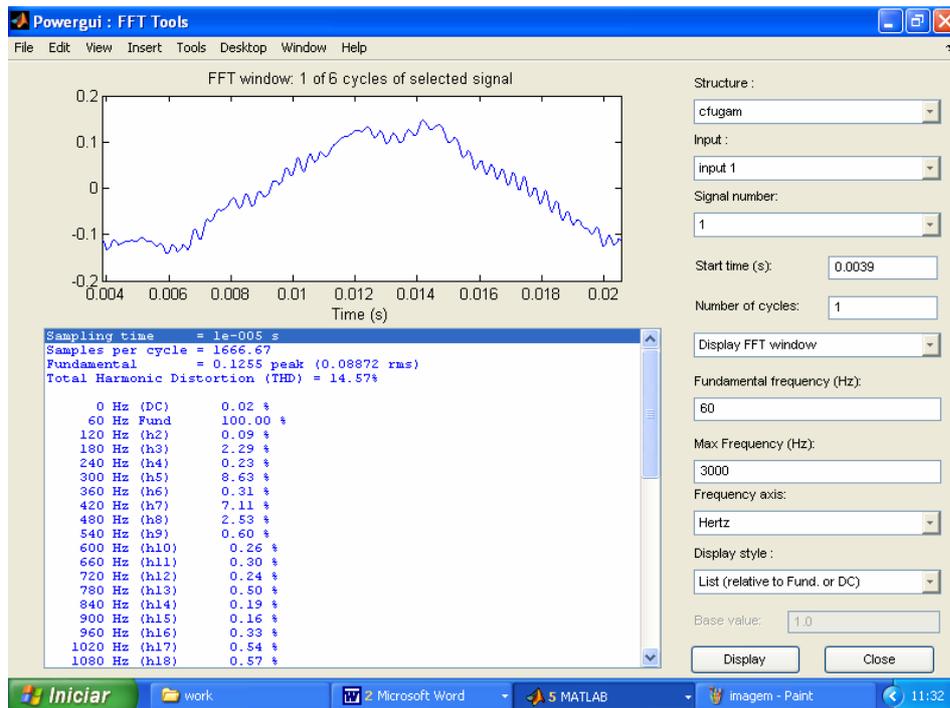
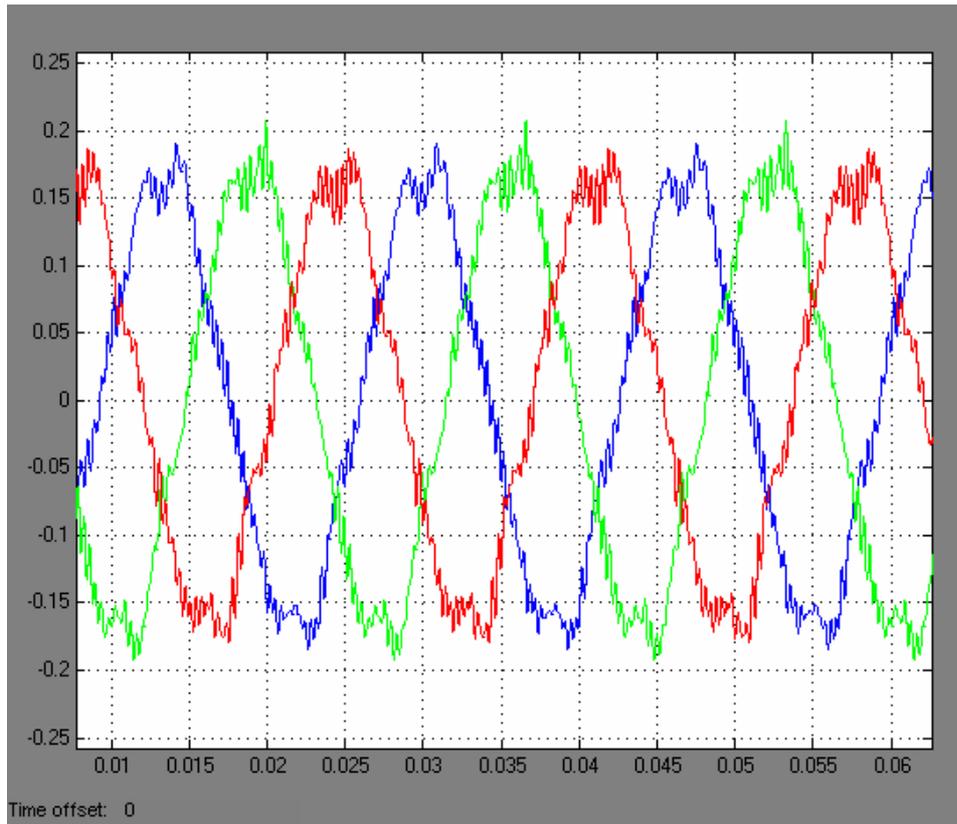


Figura 4. 7 – Lista de porcentagens da decomposição harmônica da corrente de fuga obtida via simulação.

Os dados tanto de entrada como de saída foram salvos em diferentes arquivos texto. Estes arquivos irão alimentar uma RNA, descrita no capítulo 5 para determinar a localização de uma falha em LT.

A figura 4.8 apresenta a forma de onda típica da corrente de fuga para uma situação de falha na torre 1, considerando a capacitância  $C_3$ .



**Figura 4.8** - Forma de onda da corrente de fuga para uma falha na torre 1 considerando a capacitância  $C_3$ .

Uma falha que ocorre no início de uma LT acarreta numa decomposição harmônica da corrente de fuga diferente de uma falha que ocorre no fim desta. Isto pode ser verificado através das figuras 4.9, 4.10 e 4.11 que apresentam o espectro harmônico da corrente de fuga para falhas geradas considerando a capacitância  $C_3$  nas torres 1, 5 e 10 respectivamente. Na Tabela 4.1. está a decomposição harmônica para as três falhas em porcentagens da fundamental.

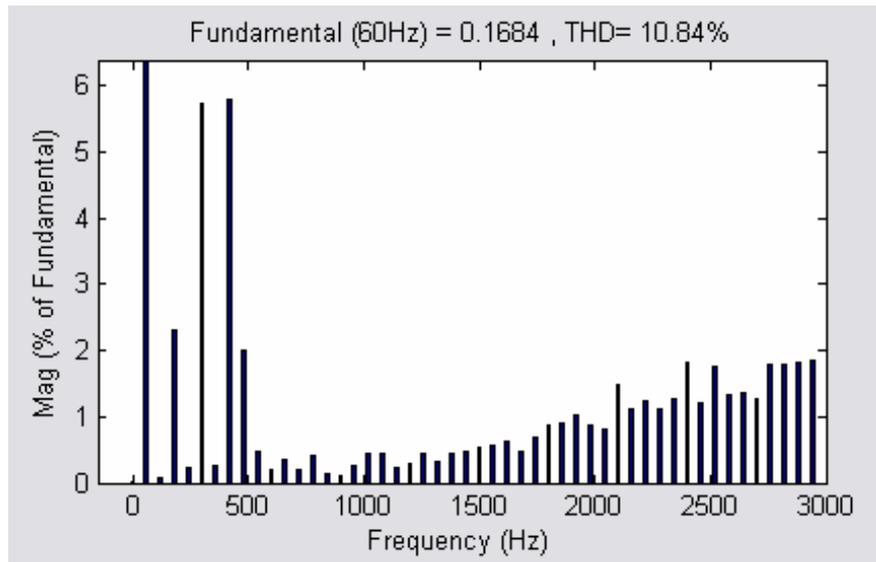


Figura 4.9 - Espectro harmônico da corrente de fuga para uma falha na 1ª torre com capacitância  $C_3$ .

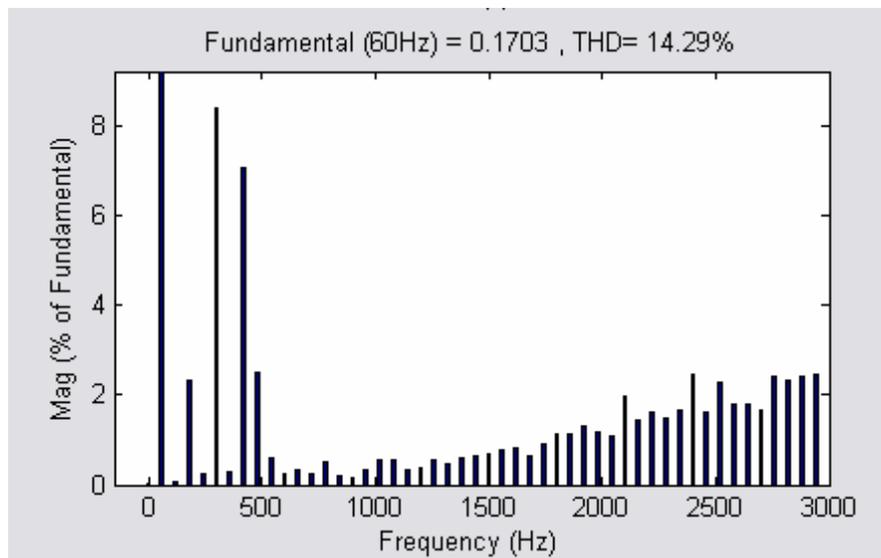


Figura 4.10 - Espectro harmônico da corrente de fuga para uma falha na 5ª torre com capacitância  $C_3$ .

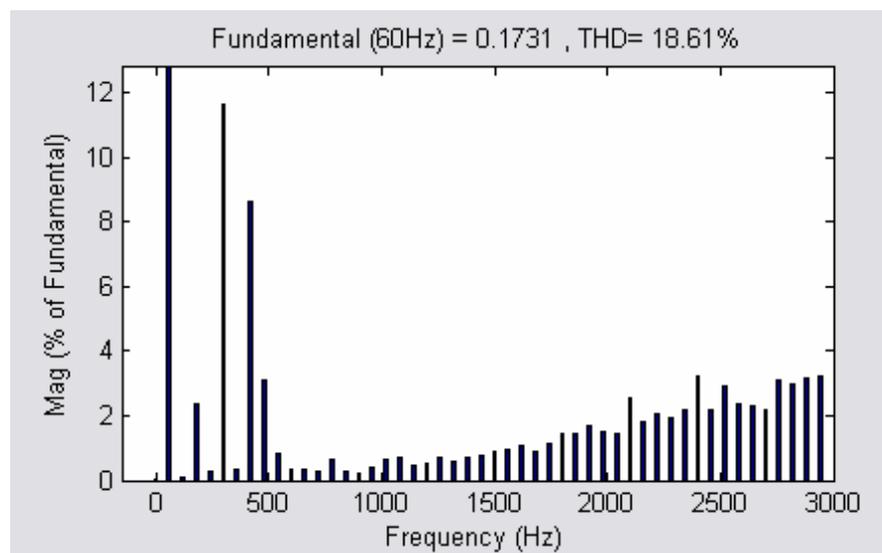


Figura 4.11 - Espectro harmônico da corrente de fuga para uma falha na 10ª torre com capacitância  $C_3$ .

**Tabela 4. 1** - Decomposição harmônica da corrente de fuga para uma falha em diferentes trechos de uma linha de transmissão para uma mesma capacitância de falha  $C_3$ .

| Harmônico     | Início (Torre 1) | Meio (Torre 5) | Fim (Torre 10) |
|---------------|------------------|----------------|----------------|
| 120 Hz (h2)   | 0,09 %           | 0,09 %         | 0,09 %         |
| 180 Hz (h3)   | 2,31 %           | 2,33 %         | 2,35 %         |
| 240 Hz (h4)   | 0,22 %           | 0,23 %         | 0,25 %         |
| 300 Hz (h5)   | 5,73 %           | 8,37 %         | 11,60 %        |
| 360 Hz (h6)   | 0,27 %           | 0,31 %         | 0,35 %         |
| 420 Hz (h7)   | 5,78 %           | 7,06 %         | 8,63 %         |
| 480 Hz (h8)   | 1,99 %           | 2,49 %         | 3,10 %         |
| 540 Hz (h9)   | 0,49 %           | 0,59 %         | 0,82 %         |
| 600 Hz (h10)  | 0,19 %           | 0,26 %         | 0,34 %         |
| 660 Hz (h11)  | 0,35 %           | 0,31 %         | 0,34 %         |
| 720 Hz (h12)  | 0,20 %           | 0,24 %         | 0,29 %         |
| 780 Hz (h13)  | 0,41 %           | 0,49 %         | 0,62 %         |
| 840 Hz (h14)  | 0,13 %           | 0,19 %         | 0,25 %         |
| 900 Hz (h15)  | 0,12 %           | 0,15 %         | 0,21 %         |
| 960 Hz (h16)  | 0,26 %           | 0,33 %         | 0,40 %         |
| 1020 Hz (h17) | 0,44 %           | 0,53 %         | 0,64 %         |
| 1080 Hz (h18) | 0,45 %           | 0,56 %         | 0,71 %         |
| 1140 Hz (h19) | 0,23 %           | 0,33 %         | 0,45 %         |
| 1200 Hz (h20) | 0,28 %           | 0,39 %         | 0,52 %         |
| 1260 Hz (h21) | 0,43 %           | 0,54 %         | 0,68 %         |
| 1320 Hz (h22) | 0,33 %           | 0,45 %         | 0,60 %         |
| 1380 Hz (h23) | 0,45 %           | 0,58 %         | 0,74 %         |
| 1440 Hz (h24) | 0,49 %           | 0,62 %         | 0,79 %         |
| 1500 Hz (h25) | 0,52 %           | 0,68 %         | 0,87 %         |
| 1560 Hz (h26) | 0,58 %           | 0,76 %         | 0,97 %         |
| 1620 Hz (h27) | 0,64 %           | 0,82 %         | 1,05 %         |
| 1680 Hz (h28) | 0,48 %           | 0,66 %         | 0,88 %         |
| 1740 Hz (h29) | 0,70 %           | 0,89 %         | 1,12 %         |
| 1800 Hz (h30) | 0,88 %           | 1,12 %         | 1,42 %         |
| 1860 Hz (h31) | 0,89 %           | 1,14 %         | 1,43 %         |
| 1920 Hz (h32) | 1,04 %           | 1,33 %         | 1,68 %         |
| 1980 Hz (h33) | 0,87 %           | 1,16 %         | 1,51 %         |
| 2040 Hz (h34) | 0,80 %           | 1,08 %         | 1,42 %         |
| 2100 Hz (h35) | 1,49 %           | 1,98 %         | 2,57 %         |
| 2160 Hz (h36) | 1,10 %           | 1,42 %         | 1,81 %         |
| 2220 Hz (h37) | 1,25 %           | 1,60 %         | 2,04 %         |
| 2280 Hz (h38) | 1,13 %           | 1,50 %         | 1,95 %         |
| 2340 Hz (h39) | 1,27 %           | 1,68 %         | 2,18 %         |
| 2400 Hz (h40) | 1,82 %           | 2,44 %         | 3,20 %         |
| 2460 Hz (h41) | 1,21 %           | 1,63 %         | 2,15 %         |
| 2520 Hz (h42) | 1,75 %           | 2,28 %         | 2,92 %         |
| 2580 Hz (h43) | 1,33 %           | 1,79 %         | 2,36 %         |
| 2640 Hz (h44) | 1,35 %           | 1,78 %         | 2,31 %         |
| 2700 Hz (h45) | 1,27 %           | 1,67 %         | 2,16 %         |
| 2760 Hz (h46) | 1,80 %           | 2,39 %         | 3,12 %         |
| 2820 Hz (h47) | 1,80 %           | 2,33 %         | 2,99 %         |
| 2880 Hz (h48) | 1,82 %           | 2,42 %         | 3,15 %         |
| 2940 Hz (h49) | 1,85 %           | 2,47 %         | 3,23 %         |

Nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11 observa-se que o a distorção harmônica total é maior para falhas ocorridas mais próximas do terminal remoto, THD igual a 10,84%, 14,29% e 18,61%, quer dizer, em magnitude as harmônicas são maiores no fim da LT. Porém percebe-se, também, que a forma do espectro harmônico segue o mesmo padrão, evidenciando uma correlação entre estas, ou ainda a falha foi gerada com a mesma capacitância.

A idéia do padrão de uma decomposição harmônica esconder informações sobre o nível de isolamento da linha, e conseqüentemente de uma falha, constitui-se como a principal hipótese do presente trabalho. Tal hipótese é fortalecida com base nas observações acima feitas com relação ao espectro harmônico.

## **Conclusão**

Este capítulo abordou a metodologia de simulação do modelo desde o tratamento de dados de entrada até os tipos de saída possíveis.

O modelo desenvolvido em *Simulink* apresentou-se eficiente, matematicamente simples e possibilita alterações e/ou adaptações segundo mudanças ambientais. Outro ponto importante é a introdução de dados reais obtidos pelo analisador *Power Sentinel 1133 A*.

A validação do modelo foi feita através da comparação das formas de onda da corrente de fuga obtidas primeiramente por uma rotina que utiliza a teoria das superfícies fechadas e em seguida pelo modelo Pi desenvolvido. As duas formas de onda são bastante parecidas e estão na mesma ordem de grandeza.

É possível observar as diferentes correntes de fuga para falhas ocorridas em diferentes trechos da linha para uma mesma capacitância geradora da falha. Observa-se, ainda, que estas correntes de fuga apesar de serem diferentes seguem um mesmo padrão. Considerando estas diferenças, foi desenvolvida uma RNA para determinar a localização de uma falha dada uma decomposição harmônica da corrente de fuga. A RNA está descrita no capítulo 5.

Uma possibilidade para se obter dados de capacitância que descrevam uma situação de falha e/ou falta é a realização de ensaios sobre um isolador e generalizar o resultado utilizando o Método de Elementos Finitos. Valores de capacitância limitantes propiciariam não só a localização de falhas, mas a predição destas, tornando a metodologia apresentada neste trabalho muito mais eficiente.

## CAPÍTULO 5

# REDES NEURAIS ARTIFICIAIS APLICADAS A DETERMINAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

### 5.1. Definição de Redes Neurais Artificiais

A incrível capacidade de o cérebro humano organizar seus constituintes estruturais para realizar processamentos (reconhecimento de padrões, percepção, controle motor e etc) de modo muito rápido motivou diversos pesquisadores das mais diversas áreas a criarem uma estrutura computacional que, pelo menos em seu funcionamento, se parecesse com este. Tal estrutura é chamada de rede neural artificial.

Haykin em [47] define uma RNA como:

*Um processador maciçamente paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso. Ela se assemelha ao cérebro humano em dois aspectos:*

- 1- O conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem.*
- 2- Forças de conexão entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido.*

As RNAs apresentam vantagens significativas com relação à outros tipos de algoritmos.

Suas principais vantagens são:

- Generalização: Esta possibilita produzir saídas adequadas para entradas que não estavam presentes no treinamento.
- Não-linearidade: Uma RNA pode ser linear ou não-linear de acordo com as características de seus neurônios.

- Mapeamento de entrada-saída: Os pesos sinápticos são modificados para minimizar a diferença entre a resposta desejada e a resposta real da rede.
- Adaptabilidade: As RNAs adaptam seus pesos sinápticos segundo modificações no meio ambiente.

Além destas características as RNAs são capazes de resolver problemas nos quais se sabe muito pouco ou nada sobre a solução procurada.

## 5.2. Breve Histórico

- W. S. McCulloch e W. Pitts (1943): Desenvolvem o primeiro modelo de neurônio artificial (Threshold Logic Unit). Consistia numa máquina de circuitos lógicos que simulavam os neurônios biológicos. Um era fisiologista e o outro era matemático.
- D. O. Hebb (1949): Enuncia a primeira regra de aprendizagem. O aprendizado ocorria por meio de modificações nas sinapses.
- Rosenblatt (1958): apresenta uma nova abordagem para o problema de reconhecimento de padrões. Apresenta o *perceptron*, um método inovador de aprendizagem supervisionada.
- Rosenblatt (1960): Demonstra o teorema de convergência do perceptron, proposto por ele mesmo.
- Widrow e Hoff (1960): Introduziram o algoritmo do mínimo quadrado médio (LMS Least Mean-Square) e o usaram para formular o Adaline (Adaptative Linear Element).
- Misky e Papert (1969): Demonstraram que existem limites fundamentais para o perceptron de uma camada. Isto desmotivou os estudos em RNAs por cerca de uma década.
- Rumelhart e McClelland (1977): criam o grupo PDP(Processamento Paralelo Distribuído).

- Grossberg (1980): estuda novos princípios de auto-organização (ART - Adaptive Resonance Theory) com base em estudos sobre e aprendizado competitivo.
- Ackley, Hinton e Sejnowski (1985): fazem a primeira realização bem-sucedida de uma rede neural de múltiplas camadas. Para tal utilizaram a idéia, já conhecida, de uma máquina estocástica, conhecida como máquina de Boltzmann.
- Hinton, Rumelhart e Willians (1986): desenvolvem o algoritmo de retropropagação (back-propagation).

### 5.3. Modelo de um Neurônio

O neurônio é uma unidade de processamento de informação fundamental para a operação de uma rede neural artificial. A figura 5.1 ilustra o modelo de um neurônio através de diagrama de blocos. Os elementos básicos de um neurônio são:

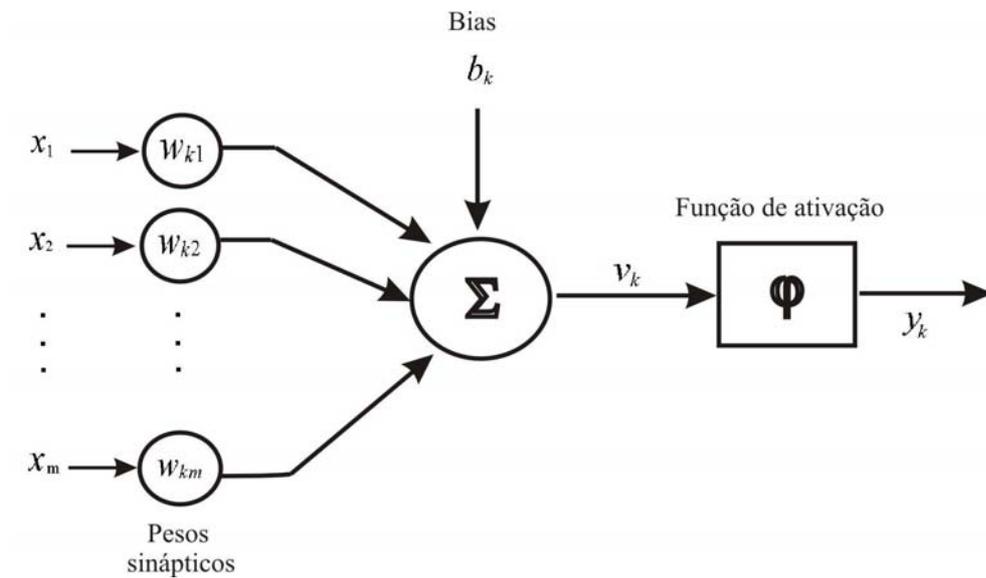
- Sinapses: São caracterizadas por um peso ou força própria. Um sinal  $x_j$  na entrada da sinapse  $j$  conectada ao neurônio  $k$  é multiplicado pelo peso sináptico  $\omega_{kj}$ .
- Somador: Soma os sinais de entrada ponderados pelas respectivas sinapses do neurônio.
- Função de Ativação: Restringe a amplitude de saída do neurônio. Usualmente a amplitude de saída do neurônio fica restrita ao intervalo  $[0,1]$  ou  $[-1,1]$ .

Um neurônio  $k$  pode ser descrito matematicamente por:

$$u_k = \sum_{j=1}^m \omega_{kj} x_j \quad (5.1)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (5.2)$$

Sendo  $x_1, x_2, \dots, x_m$  são os sinais de entrada;  $\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{km}$  são os pesos sinápticos do neurônio  $k$ ;  $u_k$  é a saída do combinador linear devido aos sinais de entrada;  $b_k$  é o bias;  $\varphi(\cdot)$  é a função de ativação; e  $y(k)$  é o sinal de saída do neurônio.



**Figura 5. 1** – Modelo de um neurônio em diagrama de blocos.

#### 5.4. Processos de Aprendizagem

Uma RNA aprende acerca de seu meio através de um processo iterativo de modificações dos pesos sináptico da rede de uma forma ordenada para alcançar um objetivo. O aprendizado utilizado para realizar o processo de aprendizagem é chamado de algoritmo de aprendizagem.

Haykin em [47] define aprendizagem como:

*Aprendizagem é um processo pelo qual os parâmetros livres de uma rede neural são adaptados através de um processo de estimulação pelo ambiente no qual a rede está inserida.*

*O tipo de aprendizagem é determinado pela maneira pela qual a modificação dos parâmetros ocorre.*

Em resumo isto quer dizer que uma RNA é estimulada pelo ambiente, sofre modificações nos parâmetros como resultado desta estimulação e ainda responde de forma diferenciada, devido as modificações ocorridas.

Existem diversos algoritmos de aprendizagem. Os mais comumente utilizados são: a aprendizagem por correção e erro, a baseada em memória, a Hebbiana, a competitiva, a de Boltzmann e as supervisionadas e não-supervisionadas.

A apresentação de todos estes processos de aprendizagem delongaria muito tempo e fugiria do escopo do presente trabalho. Em virtude disto comentaremos apenas a aprendizagem por correção de erro que foi o processo utilizado para o desenvolvimento da RNA deste trabalho.

- **Aprendizagem por correção de erro**

Considere um neurônio  $k$  que constitui o único nó computacional da camada de saída de uma RNA alimentada adiante. Este neurônio é acionado por um vetor de sinal  $\mathbf{x}(n)$  produzido por uma ou mais camadas de neurônios ocultos que são acionados por um vetor de entradas. O argumento  $n$  representa o passo de tempo de um processo iterativo envolvido no ajuste dos pesos sinápticos do neurônio  $k$ .

O sinal de saída do neurônio  $y_k(n)$  é comparado com a resposta desejada ou saída-alvo  $d_k(n)$ . Desta comparação resulta um sinal de erro  $e_k(n)$  definido por:

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n) \quad (5.3)$$

O sinal de erro  $e_k(n)$  aciona o mecanismo de controle que ajusta os pesos sinápticos do neurônio  $k$ . Tais ajustes são feitos de modo a aproximar o sinal de saída ao valor desejado. O processo é interrompido quando os pesos sinápticos ficarem estáveis, ou ainda, não sofrerem mais alterações significativas.

A estabilidade dos pesos sinápticos é alcançada com a minimização da função de custo  $E(n)$  definida por:

$$E(n) = \frac{1}{2} e_k^2(n) \quad (5.4)$$

A minimização de função de custo  $E(n)$  resulta numa regra de aprendizagem denominada regra delta ou regra de Widrow-Hoff, em homenagem aos seus criadores Widrow e Hoff (1960). A regra delta é enunciada em [47] da seguinte maneira:

*O ajuste feito em um peso sináptico de um neurônio é proporcional ao produto do sinal de erro pelo sinal de entrada da sinapse em questão.*

Suponha que  $\omega_{kj}(n)$  represente o valor do peso sináptico  $\omega_{kj}$  de neurônio  $k$  excitado por um elemento  $x_j(n)$  do vetor de sinal  $\mathbf{x}(n)$  no passo de tempo  $n$ . De acordo com a regra delta, o ajuste  $\Delta\omega_{kj}(n)$  aplicado ao peso sináptico  $\omega_{kj}$  no passo de tempo  $n$  é definido por

$$\Delta\omega_{kj}(n) = \eta e_k(n) x_j(n) \quad (5.5)$$

sendo  $\eta$  uma constante positiva denominada taxa de aprendizado.

Após ter sido calculado o ajuste sináptico  $\Delta\omega_{kj}(n)$  deve-se atualizar o peso sináptico  $\omega_{kj}$  segundo:

$$\omega_{kj}(n+1) = \omega_{kj}(n) + \Delta\omega_{kj}(n) \quad (5.6)$$

## 5.5. A Rede Neural Direta Multicamada

Rosenblatt (1958) desenvolveu uma RNA utilizada para reconhecimento de padrões linearmente separáveis denominado perceptron (de uma única camada). Este consiste basicamente em um único neurônio com pesos sinápticos ajustáveis e bias.

O teorema de convergência do perceptron, demonstrado por Rosenblatt (1960), prova que se os padrões (vetores) utilizados no treinamento do perceptron forem pertencentes a duas classes linearmente separáveis o algoritmo converge e posiciona a superfície de decisão na forma de um hiperplano entre as duas classes.

O perceptron de uma camada é limitado a realizar classificação de padrões com apenas duas classes (hipóteses), devido a possuir um único neurônio. Se for feita uma expansão no perceptron para introduzir mais um neurônio este poderá fazer classificações com mais duas classes. Seguindo este raciocínio observa-se que o perceptron de uma camada é muito limitado, para torná-lo mais eficiente foi desenvolvido o perceptron de múltiplas camadas.

A Rede Neural Direta Multicamada, ou ainda o perceptron de múltiplas camadas alimentadas adiante consiste basicamente num conjunto de unidades sensoriais (nós de fonte) que constituem a camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas (nós computacionais) e uma camada de saída. O sinal de entrada se propaga através da rede camada a camada. Este tipo de RNA tem sido aplicado com sucesso na resolução de problemas difíceis através do treinamento supervisionado com o algoritmo de retropropagação de erro conhecido com *back-propagation*.

## **5.6. O Algoritmo de Retropropagação de Erro**

O algoritmo de retropropagação de erro consiste, basicamente, em dois passos através das camadas da rede, um passo para frente, a propagação, e um para trás, a retropropagação.

No passo para frente um padrão de atividades (vetor de entrada) é aplicado aos nós sensoriais da rede e seu efeito se propaga através da rede. Neste passo os pesos sinápticos são fixos.

No passo para trás, os pesos sinápticos são ajustados segundo a aprendizagem por correção de erro. A correção do sinal, através dos pesos sinápticos, se propaga de trás para frente.

Como visto na aprendizagem por correção de erro, o sinal de erro de um neurônio  $k$  da camada de saída é dado pela equação (5.3). O valor instantâneo da energia de erro para o neurônio  $k$  é dado por (5.4). O valor instantâneo  $\mathbf{E}(n)$  da energia total do erro obtido somando  $\frac{1}{2}e_k^2(n)$  de todos os neurônios da camada de saída  $C$  é dado por:

$$\mathbf{E}(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad (5.7)$$

Os neurônios da camada de saída são os únicos em que o sinal de erro pode ser calculado diretamente.

Normalizando a energia média do erro quadrado é obtém-se:

$$E_{\text{med}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{E}(n) \quad (5.8)$$

A alteração dos pesos sinápticos resulta da minimização da função de custo  $E_{\text{med}}$  sobre o conjunto de treinamento inteiro.

O campo local induzido  $v_k(n)$  produzido na entrada da função de ativação associada ao neurônio  $k$  e portanto

$$v_k(n) = \sum_{j=0}^m \omega_{kj}(n) y_j(n) \quad (5.9)$$

Sendo  $m$  o número total de entradas (excluindo o bias) aplicadas ao neurônio  $k$ .

O sinal funcional  $y_k(n)$  que aparece na saída do neurônio  $k$  na iteração  $n$  é:

$$y_k(n) = \varphi_k(v_k(n)) \quad (5.10)$$

Aplicando uma correção  $\Delta\omega_{kj}(n)$ , que é proporcional à derivada parcial  $\frac{\partial \mathbf{E}(n)}{\partial \omega_{kj}(n)}$ . De

acordo com a regra da cadeia do cálculo, pode-se expressar o gradiente como:

$$\frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{n})}{\partial \omega_{kj}(\mathbf{n})} = \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{n})}{\partial e_k(\mathbf{n})} \frac{\partial e_k(\mathbf{n})}{\partial y_k(\mathbf{n})} \frac{\partial y_k(\mathbf{n})}{\partial v_k(\mathbf{n})} \frac{\partial v_k(\mathbf{n})}{\partial \omega_{kj}(\mathbf{n})} \quad (5.11)$$

Diferenciando (5.7) de ambos os lados em relação a  $e_k(\mathbf{n})$ , obtém-se:

$$\frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{n})}{\partial e_k(\mathbf{n})} = e_k(\mathbf{n}) \quad (5.12)$$

Diferenciando ambos os lados de (5.6) chega-se a:

$$\frac{\partial e_k(\mathbf{n})}{\partial y_k(\mathbf{n})} = -1 \quad (5.13)$$

Diferenciando ambos os lados de (5.10) com relação a  $v_k(\mathbf{n})$  chega-se a:

$$\frac{\partial y_k(\mathbf{n})}{\partial v_k(\mathbf{n})} = \phi'_k(v_k(\mathbf{n})) \quad (5.14)$$

E diferenciando (5.9) com relação a  $\omega_{kj}(\mathbf{n})$  tem-se:

$$\frac{\partial v_k(\mathbf{n})}{\partial \omega_{kj}(\mathbf{n})} = y_j(\mathbf{n}) \quad (5.15)$$

Utilizando as equações de (5.12) a (5.15) em (5.11) chega-se a:

$$\frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{n})}{\partial \omega_{kj}(\mathbf{n})} = -e_k(\mathbf{n}) \phi'_k(v_k(\mathbf{n})) y_k(\mathbf{n}) \quad (5.16)$$

A correção  $\Delta \omega_{kj}(\mathbf{n})$  aplicada a  $\omega_{kj}(\mathbf{n})$  definida pela regra delta é dada por:

$$\Delta \omega_{kj}(\mathbf{n}) = -\eta \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{n})}{\partial \omega_{kj}(\mathbf{n})} \quad (5.17)$$

sendo  $\eta$  o parâmetro da taxa de aprendizagem. O sinal negativo indica gradiente descendente.

Substituindo (5.16) em (5.17) tem-se:

$$\Delta\omega_{kj}(\mathbf{n}) = -\eta e_k(\mathbf{n}) \varphi'_k(v_k(\mathbf{n})) y_k(\mathbf{n}) \quad (5.18)$$

sendo o gradiente local  $\delta_k(\mathbf{n})$  dado por:

$$\delta_k(\mathbf{n}) = -\frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{n})}{\partial v_k(\mathbf{n})} = e_k(\mathbf{n}) \varphi'_k(v_k(\mathbf{n})) \quad (5.19)$$

O gradiente local determina as modificações necessárias nos pesos sinápticos.

Caso o neurônio  $k$  considerado esteja na última camada determina-se diretamente o gradiente através do sinal de erro  $e_k(\mathbf{n})$  associado a este. Caso contrário, isto é, considere um neurônio  $j$  esteja numa camada intermediária, o sinal de erro deste deve ser determinado de modo recursivo em termo dos sinais de erro de todos os neurônios que estão diretamente conectados a este. Sendo assim, torna-se necessário redefinir o gradiente local  $\delta_j(\mathbf{n})$  para o neurônio  $j$  camada intermediária.

$$\delta_j(\mathbf{n}) = -\frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{n})}{\partial y_j(\mathbf{n})} \frac{\partial y_j(\mathbf{n})}{\partial v_j(\mathbf{n})} \quad (5.20)$$

$$\delta_j(\mathbf{n}) = -\frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{n})}{\partial y_j(\mathbf{n})} \varphi'_j(v_j(\mathbf{n})) \quad (5.21)$$

Diferenciando a equação (5.7) em relação ao funcional  $y_k(\mathbf{n})$ , obtém-se:

$$\frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{n})}{\partial y_j(\mathbf{n})} = \sum_k e_k(\mathbf{n}) \frac{\partial e_k(\mathbf{n})}{\partial y_j(\mathbf{n})} \quad (5.22)$$

Utilizando a regra da cadeia e reescrevendo (5.22):

$$\frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{n})}{\partial y_j(\mathbf{n})} = \sum_k e_k(\mathbf{n}) \frac{\partial e_k(\mathbf{n})}{\partial v_k(\mathbf{n})} \frac{\partial v_k(\mathbf{n})}{\partial y_j(\mathbf{n})} \quad (5.23)$$

Para um neurônio  $k$  no nó de saída, tem-se:

$$\frac{\partial e_k(\mathbf{n})}{\partial v_k(\mathbf{n})} = -\phi'_k(v_k(\mathbf{n})) \quad (5.24)$$

Para um neurônio  $k$  o campo local induzido é:

$$v_k(\mathbf{n}) = \sum_{i=0}^m \omega_{ki}(\mathbf{n}) y_i(\mathbf{n}) \quad (5.25)$$

Sendo  $m$  o número total de entradas aplicadas a  $k$ . Diferenciando (5.25) em relação a  $y_j(\mathbf{n})$

tem-se :

$$\frac{\partial v_k(\mathbf{n})}{\partial y_j(\mathbf{n})} = \omega_{kj}(\mathbf{n}) \quad (5.26)$$

Utilizando (5.24), (5.26) em (5.23) obtém-se:

$$\frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{n})}{\partial y_j(\mathbf{n})} = \sum_k e_k(\mathbf{n}) \phi'_k(v_k(\mathbf{n})) \omega_{kj}(\mathbf{n}) \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{n})}{\partial y_j(\mathbf{n})} = \sum_k \delta_k(\mathbf{n}) \omega_{kj}(\mathbf{n}) \quad (5.28)$$

Utilizando (5.28) em (5.21) obtém-se a buscada fórmula de retropropagação de erro para o gradiente local  $\delta_j(\mathbf{n})$ :

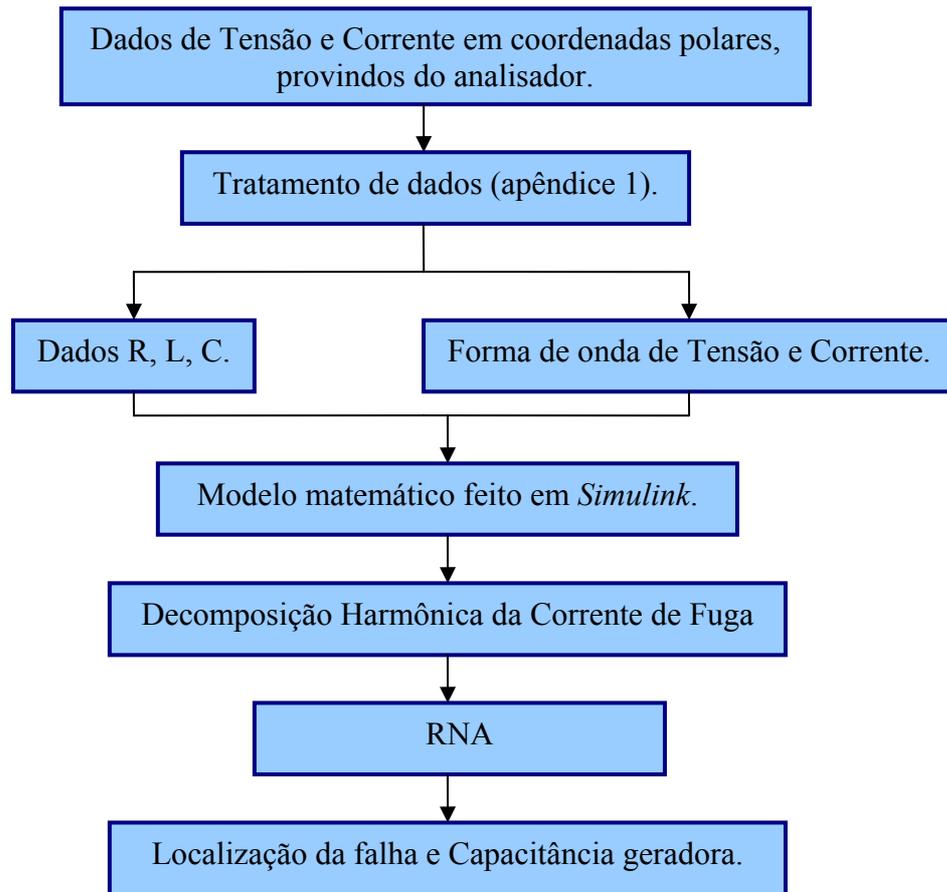
$$\delta_j(\mathbf{n}) = \phi'_j(v_j(\mathbf{n})) \sum_k \delta_k(\mathbf{n}) \omega_{kj}(\mathbf{n}) \quad (5.29)$$

## 5.7. Rede Neural Desenvolvida para Localizar Falhas em Linhas de Transmissão

Uma RNA foi desenvolvida para localizar falhas em linhas de transmissão. Esta RNA foi programada de tal forma que para uma dada decomposição harmônica de corrente de fuga

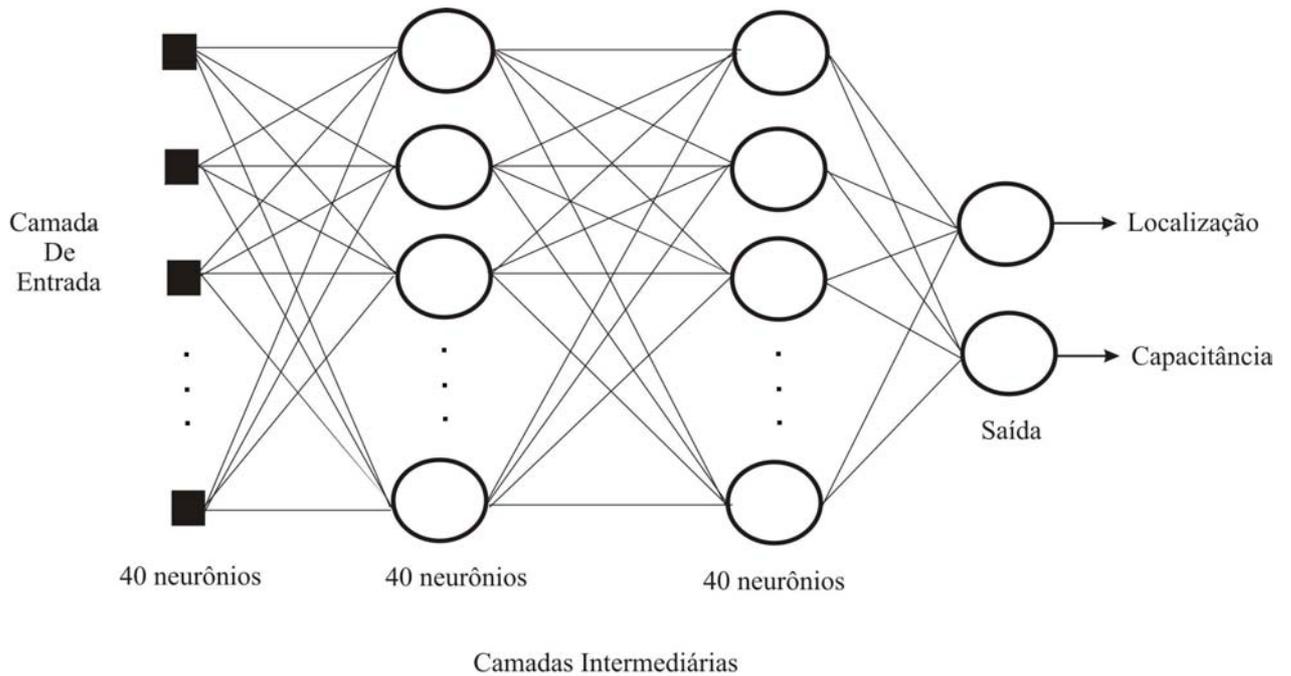
esta forneça a localização da falha e dados de capacitância de falha, podendo assim saber-se, em princípio, se a falha requer manutenção imediata ou se pode ser programada.

As entradas da RNA são as decomposições harmônicas da corrente de fuga obtidas via simulação, como explanado no capítulo 4. Os 41 arquivos obtidos através da simulação foram organizados em um único arquivo de maneira que cada linha do arquivo correspondesse a uma decomposição harmônica. Portanto a variável de entrada é uma matriz  $48 \times 41$ . Suas saídas são valores de capacitância e de localização da torre, sendo que estas duas variáveis apresentam-se juntas numa matriz de saída de dimensão  $2 \times 41$ . Tanto na entrada como na saída são consideradas 4 condições de falhas por torre e a condição normal de funcionamento. A figura 5.2 ilustra um organograma que descreve todo o procedimento feito desde a obtenção dos dados de tensão e corrente, através do analisador, até a localização da falha e da capacitância geradora da falha.



**Figura 5. 2** – Organograma de procedimento do trabalho.

Inicialmente tentou-se fazer uma RNA com apenas uma camada escondida, porém observou-se que o tempo de treinamento era muito longo, e que quase sempre o resultado não era satisfatório. Uma boa arquitetura (aqui referindo-se ao número de neurônios) encontrada foi (40, 40, 40, 2), isto é, foram colocadas duas camadas intermediárias, figura 5.3. Outras arquiteturas foram testadas e observou-se que algumas apresentam melhores resultados para falhas nas primeiras torres, enquanto que outras arquiteturas mostravam-se melhores para localizar falhas nas últimas torres.



**Figura 5.3** – Arquitetura da RNA desenvolvida.

Na RNA foram utilizadas as funções de ativação Logsigmóide (*logsig*), nas três primeiras camadas e a Linear (*purelin*) na última. O treinamento utilizado foi o *trainrp* o qual atualiza valores de pesos e bias segundo o algoritmo de retropropagação resiliente, também conhecido como RPROP.

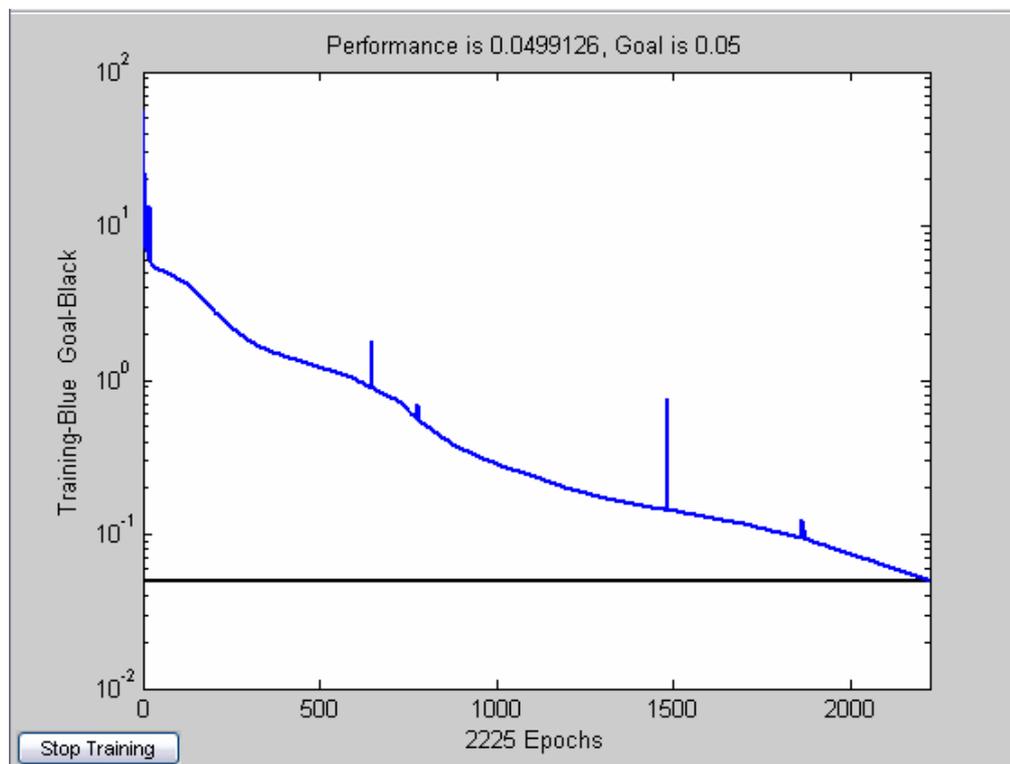
No intuito de superar algumas desvantagens do algoritmo de retropropagação de erro clássico o RPROP atualiza os pesos localmente segundo o comportamento da função erro. Neste algoritmo os pesos são atualizados somente segundo o sinal das derivadas parciais e não segundo suas magnitudes, isto faz com que todos os pesos tenham a mesma capacidade de atualização independente da localização destes neurônios.

De modo sucinto o algoritmo de treinamento RPROP pode ser descrito da seguinte forma: cada derivada parcial do erro  $E$  com relação ao peso correspondente  $\omega_{ij}$  que muda de sinal indica que a última atualização do algoritmo foi grande demais e “pulou” um mínimo local, para resolver isto o RPROP atualiza os pesos via  $\Delta\omega_{ij}$  decrescendo-o de um fator  $\eta^-$ . Caso a derivada mantenha o seu sinal,  $\Delta\omega_{ij}$  é incrementado sutilmente para acelerar a convergência.

Detalhes sobre o algoritmo RPROP e suas peculiaridades podem ser vistas em [48].

O treinamento foi iniciado com uma meta (erro médio) de 0,05, valor este para o qual as saídas para os dados de treinamento encontravam-se muito próximos dos dados de entrada, tabela 5.1, porém nesta situação as saídas para os dados de teste (dados que não estavam no treinamento) não eram muito boas, como visto na tabela 5.2, então decidiu-se elevar a meta para 0,1 mantendo-se exatamente o mesmo conjunto de treinamento. Para a rede treinada com a meta de 0,1 as saídas para os dados de treinamento não se apresentavam tão próximas como no caso anterior, como observado na tabela 5.3, mas as saídas para os dados de teste apresentavam-se melhores, conforme tabela 5.4. Isto evidenciou que a rede estava sendo sobre-treinada ao utilizar a meta de 0,05 e que, portanto perdia o seu poder de generalização. Uma melhor resposta da rede foi encontrada ao utilizar a meta de 0,1.

Tanto para a meta de 0,1 como para 0,05 o treinamento da rede é bem rápido demorando apenas poucos minutos. A rede atinge a meta de 0,05 (que é um limite inferior para o erro na rede) com 2225 épocas como pode ser visto na figura 5.4.



**Figura 5. 4** – Desempenho da RNA desenvolvida com meta de 0,05.

Como já comentado as saídas da rede para os próprios dados de treinamento, no caso de meta 0,05, foram bem próximos dos valores esperados, a tabela 5.1. Nesta Lc é referente a localização da falha e C à capacitância geradora da falha. A localização Lc = 0 significa condição normal de funcionamento, os demais valores de Lc são situações de falha.

**Tabela 5. 1** – Dados que estavam no treinamento da rede (meta de 0,05) e valores obtidos após o treinamento desta.

| Dados de treinamento |    | Saída da rede |         | Dados de treinamento |    | Saída da rede |         |
|----------------------|----|---------------|---------|----------------------|----|---------------|---------|
| C                    | Lc | C             | Lc      | C                    | Lc | C             | Lc      |
| 1,6344e-10           | 0  | 1,6824 e-10   | 0,0064  | 7,7749e-10           | 1  | 7,7816 e-10   | 0,9909  |
| 2,7449e-10           | 1  | 2,7209 e-10   | 1,0015  | 7,7749e-10           | 2  | 7,7880 e-10   | 1,9901  |
| 2,7449e-10           | 2  | 2,8340 e-10   | 1,9929  | 7,7749e-10           | 3  | 7,8348 e-10   | 2,9670  |
| 2,7449e-10           | 3  | 2,7883 e-10   | 2,9877  | 7,7749e-10           | 4  | 7,7416 e-10   | 4,0031  |
| 2,7449e-10           | 4  | 3,7472 e-10   | 4,3214  | 7,7749e-10           | 5  | 7,5029 e-10   | 5,1424  |
| 2,7449e-10           | 5  | 2,3031 e-10   | 4,9618  | 7,7749e-10           | 6  | 7,6019 e-10   | 6,0053  |
| 2,7449e-10           | 6  | 2,6131 e-10   | 6,0884  | 7,7749e-10           | 7  | 7,8602 e-10   | 7,0679  |
| 2,7449e-10           | 7  | 2,8422 e-10   | 6,7495  | 7,7749e-10           | 8  | 7,5756 e-10   | 7,9001  |
| 2,7449e-10           | 8  | 2,7790 e-10   | 7,5950  | 7,7749e-10           | 9  | 7,8074 e-10   | 9,0578  |
| 2,7449e-10           | 9  | 3,6649 e-10   | 8,6857  | 7,7749e-10           | 10 | 7,7773 e-10   | 10,0021 |
| 2,7449e-10           | 10 | 2,7433 e-10   | 10,0270 | 13,0757e-10          | 1  | 13,0755 e-10  | 1,0003  |
| 4,6230e-10           | 1  | 4,5943 e-10   | 1,0185  | 13,0757e-10          | 2  | 13,0772 e-10  | 2,0001  |
| 4,6230e-10           | 2  | 4,4897 e-10   | 2,0721  | 13,0757e-10          | 3  | 13,0728 e-10  | 3,0164  |
| 4,6230e-10           | 3  | 4,8665 e-10   | 2,9437  | 13,0757e-10          | 4  | 13,0682 e-10  | 3,9844  |
| 4,6230e-10           | 4  | 4,5774 e-10   | 4,0100  | 13,0757e-10          | 5  | 13,0496 e-10  | 4,9683  |
| 4,6230e-10           | 5  | 4,1893 e-10   | 4,5290  | 13,0757e-10          | 6  | 12,9664 e-10  | 6,1979  |
| 4,6230e-10           | 6  | 4,7144 e-10   | 6,4527  | 13,0757e-10          | 7  | 13,1654 e-10  | 6,9815  |
| 4,6230e-10           | 7  | 3,9434 e-10   | 7,3283  | 13,0757e-10          | 8  | 13,0623 e-10  | 7,9588  |
| 4,6230e-10           | 8  | 4,5763 e-10   | 7,9137  | 13,0757e-10          | 9  | 13,0701 e-10  | 8,9845  |
| 4,6230e-10           | 9  | 4,5616 e-10   | 9,0169  | 13,0757e-10          | 10 | 13,0810 e-10  | 9,9942  |
| 4,6230e-10           | 10 | 4,7727 e-10   | 10,0871 |                      |    |               |         |

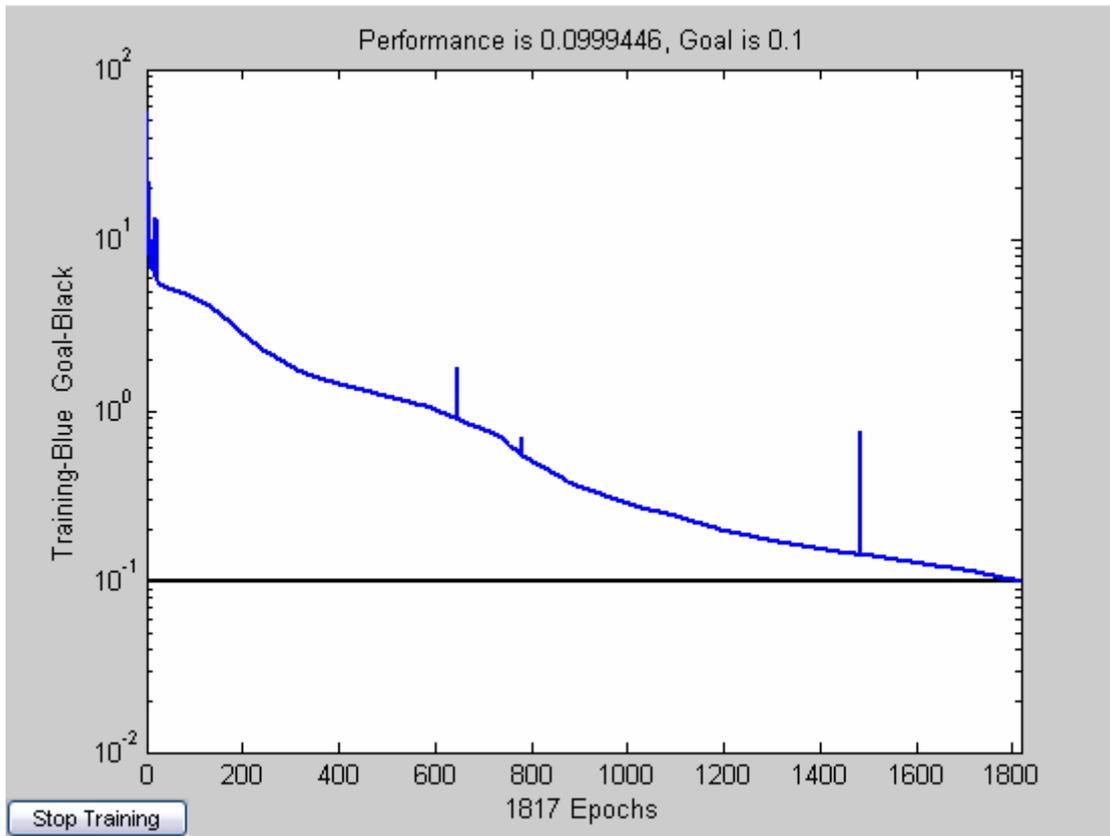
Dados que não estavam presentes no treinamento também foram submetidos à rede, no intuito de validação. Foram criados 20 arquivos de teste, dois valores distintos de capacitância para cada torre. A tabela 5.2 mostra os resultados obtidos com este grupo de dados.

**Tabela 5. 2** – Dados de entrada e saída de testes (não pertenciam ao treinamento) para a meta de 0,05.

| Valores de entrada da simulação |    | Saída da rede |         | Conceitos |
|---------------------------------|----|---------------|---------|-----------|
| C                               | Lc | C             | Lc      |           |
| 3e-10                           | 1  | 3,5672 e-10   | 0,9311  | Muito bom |
| 8e-10                           | 1  | 6,5488 e-10   | 0,2155  | Bom       |
| 3e-10                           | 2  | 1,1737 e-10   | 1,6494  | Muito bom |
| 8e-10                           | 2  | 2,0790 e-10   | 7,4456  | Ruim      |
| 3e-10                           | 3  | 7,4391 e-10   | 3,9100  | Bom       |
| 8e-10                           | 3  | 3,4803 e-10   | 0,1776  | Ruim      |
| 3e-10                           | 4  | 5,7999 e-10   | 5,0299  | Bom       |
| 8e-10                           | 4  | 7,3912 e-10   | 4,0503  | Muito Bom |
| 3e-10                           | 5  | 3,5395 e-10   | 3,6638  | Bom       |
| 8e-10                           | 5  | 7,4160 e-10   | 5,0669  | Muito bom |
| 3e-10                           | 6  | 9,6772 e-10   | 5,2398  | Bom       |
| 8e-10                           | 6  | 5,8699 e-10   | 7,0743  | Bom       |
| 3e-10                           | 7  | 4,8703 e-10   | 6,2141  | Bom       |
| 8e-10                           | 7  | 9,4374 e-10   | 5,2907  | Razoável  |
| 3e-10                           | 8  | 6,2786 e-10   | 5,3234  | Ruim      |
| 8e-10                           | 8  | 5,8321 e-10   | 8,7735  | Bom       |
| 3e-10                           | 9  | 3,6999 e-10   | 9,5632  | Bom       |
| 8e-10                           | 9  | 5,9991 e-10   | 10,9139 | Razoável  |
| 3e-10                           | 10 | 3,6860 e-10   | 6,9551  | Ruim      |
| 8e-10                           | 10 | 11,9764 e-10  | 9,9514  | Muito bom |

Sendo os conceitos atribuídos com relação à proximidade da saída com a entrada referente à localização da falha. Ou ainda, deu-se o conceito “Muito bom” nos casos em que o valor do parâmetro localização quando arredondado era igual ao valor de entrada, “Bom” nos casos em que o arredondamento era igual ao inteiro imediatamente abaixo ou acima, “Razoável” em que o arredondamento era igual a duas unidades abaixo ou acima e o conceito “Ruim” foi dado nos demais casos.

A rede treinada para uma meta de 0,1 atinge esta meta com 1817 épocas, como mostrado na figura 5.5.



**Figura 5.5** - Desempenho da RNA desenvolvida com meta de 0,1.

As tabelas 5.3 e 5.4 mostram o desempenho da RNA para a meta de 0,1. Na tabela 5.3 pode se ver os dados de entrada e saída no treinamento, na tabela 5.4 vê-se os dados de entrada e saída para os testes aplicados à rede.

**Tabela 5.3** – Dados que estavam no treinamento da rede (meta de 0,1) e valores obtidos após o treinamento desta.

| Dados de treinamento |    | Saída da rede |         | Dados de treinamento |    | Saída da rede |        |
|----------------------|----|---------------|---------|----------------------|----|---------------|--------|
| C                    | Lc | C             | Lc      | C                    | Lc | C             | Lc     |
| 1,6344e-10           | 0  | 1,7298 e-10   | 0,0587  | 7,7749e-10           | 1  | 7.7902 e-10   | 0,9801 |
| 2,7449e-10           | 1  | 2,7567 e-10   | 0,9989  | 7,7749e-10           | 2  | 7,7523 e-10   | 2,0141 |
| 2,7449e-10           | 2  | 2,9101 e-10   | 2,0481  | 7,7749e-10           | 3  | 7,7726 e-10   | 3,0021 |
| 2,7449e-10           | 3  | 2,7015 e-10   | 2,9560  | 7,7749e-10           | 4  | 7.6078 e-10   | 3.9452 |
| 2,7449e-10           | 4  | 4,5005 e-10   | 4,4947  | 7,7749e-10           | 5  | 7.1515 e-10   | 5.0252 |
| 2,7449e-10           | 5  | 2,3009 e-10   | 4,8363  | 7,7749e-10           | 6  | 7.7869 e-10   | 6.0418 |
| 2,7449e-10           | 6  | 2,6189 e-10   | 6,1987  | 7,7749e-10           | 7  | 7.7647 e-10   | 7.1110 |
| 2,7449e-10           | 7  | 2,8944 e-10   | 6,7600  | 7,7749e-10           | 8  | 7.4338 e-10   | 8.0044 |
| 2,7449e-10           | 8  | 2,8887 e-10   | 7,2711  | 7,7749e-10           | 9  | 7.8057 e-10   | 9.0520 |
| 2,7449e-10           | 9  | 3,7397 e-10   | 8,6022  | 7,7749e-10           | 10 | 7,7647 e-10   | 9,9779 |
| 2,7449e-10           | 10 | 2,8021 e-10   | 10,0606 | 13,0757e-10          | 1  | 13,0895 e-10  | 1,0011 |
| 4,6230e-10           | 1  | 4,6130 e-10   | 1,0213  | 13,0757e-10          | 2  | 13,0806 e-10  | 1,9890 |
| 4,6230e-10           | 2  | 4,5815 e-10   | 2,1278  | 13,0757e-10          | 3  | 13,0741 e-10  | 3,0320 |
| 4,6230e-10           | 3  | 4,8427 e-10   | 2,9869  | 13,0757e-10          | 4  | 13,0760 e-10  | 3,9774 |
| 4,6230e-10           | 4  | 4,6134 e-10   | 3,9836  | 13,0757e-10          | 5  | 13,0144 e-10  | 4,9610 |
| 4,6230e-10           | 5  | 3,9971 e-10   | 4,5485  | 13,0757e-10          | 6  | 12,7867 e-10  | 6,1913 |
| 4,6230e-10           | 6  | 4,4700 e-10   | 6,5789  | 13,0757e-10          | 7  | 13,2705 e-10  | 7,0701 |
| 4,6230e-10           | 7  | 3,8084 e-10   | 7,5239  | 13,0757e-10          | 8  | 13,0811 e-10  | 7,9692 |
| 4,6230e-10           | 8  | 4,6377 e-10   | 7,8757  | 13,0757e-10          | 9  | 13,0684 e-10  | 9,0080 |
| 4,6230e-10           | 9  | 4,5046 e-10   | 9,0329  | 13,0757e-10          | 10 | 13,0290 e-10  | 9,9998 |
| 4,6230e-10           | 10 | 4,8466 e-10   | 9,9176  |                      |    |               |        |

**Tabela 5.4** – Dados de entrada e saída de testes (não pertenciam ao treinamento) para a meta de 0,1.

| Valores de entrada da simulação |    | Saída da rede |         | Conceitos |
|---------------------------------|----|---------------|---------|-----------|
| C                               | Lc | C             | Lc      |           |
| 3e-10                           | 1  | 2,5061 e-10   | 0,9455  | Muito bom |
| 8e-10                           | 1  | 6,5806 e-10   | 0,3152  | Bom       |
| 3e-10                           | 2  | 1,6236 e-10   | 1,7084  | Muito bom |
| 8e-10                           | 2  | 2,5648 e-10   | 2,9802  | Bom       |
| 3e-10                           | 3  | 7,3484 e-10   | 3,8889  | Bom       |
| 8e-10                           | 3  | 3,5275 e-10   | 0,1559  | Ruim      |
| 3e-10                           | 4  | 6,1924 e-10   | 5,0980  | Bom       |
| 8e-10                           | 4  | 7,2799 e-10   | 3,9858  | Muito bom |
| 3e-10                           | 5  | 3,7849 e-10   | 3,5580  | Razoável  |
| 8e-10                           | 5  | 7,0547 e-10   | 4,9491  | Muito bom |
| 3e-10                           | 6  | 9,6529 e-10   | 5,6725  | Muito bom |
| 8e-10                           | 6  | 6,0441 e-10   | 6,9408  | Bom       |
| 3e-10                           | 7  | 4,6261 e-10   | 6,1948  | Bom       |
| 8e-10                           | 7  | 9,6427 e-10   | 4,9615  | Ruim      |
| 3e-10                           | 8  | 5,8131 e-10   | 5,4770  | Ruim      |
| 8e-10                           | 8  | 5,7633 e-10   | 8,8366  | Bom       |
| 3e-10                           | 9  | 3,9266 e-10   | 9,7598  | Bom       |
| 8e-10                           | 9  | 6,2263 e-10   | 10,4250 | Bom       |
| 3e-10                           | 10 | 3,4943 e-10   | 7,3896  | Ruim      |
| 8e-10                           | 10 | 12,7744 e-10  | 9,8348  | Muito bom |

## 5.8. Comentários sobre os resultados

Para os dados de treinamento, tabelas 5.1 e 5.3, os valores de saída apresentados são muito próximos dos valores de entrada.

Para os dados de teste os resultados não são tão próximos dos valores de entrada, mas ainda assim próximos o suficiente para localizarem o trecho faltoso de uma LT. Observa-se que os valores de capacitância também são satisfatórios, podendo assim identificar a capacitância que gerou a falha. Por isto os resultados apresentados pela RNA são considerados bons e aplicáveis ao que se propôs fazer. É importante salientar que o modelo aqui proposto é um protótipo, e que um modelo mais realista deveria englobar 50 torres como no trecho Guamá-Utinga.

Foram gerados dados de entrada contendo 81 arquivos, através destes foi possível observar que a geração de conjuntos maiores de dados não contribuem significativamente no desempenho da RNA, uma vez que o tempo de treinamento da RNA era bem maior, e quase sempre as saídas eram piores que as fornecidas pela RNA treinada com apenas 41 arquivos. Possivelmente o conjunto de 41 arquivos já contempla informação suficiente sobre a disposição de falhas nos 10 trechos considerados.

A RNA foi testada, também com sucesso, para dados em condição normal de funcionamento medidos em outros dias, 18/11/05 e 19/11/05. É interessante frisar que existem muitas condições normais de funcionamento, uma vez que pequenas variações de capacitância podem não ser falhas, e ainda sim apresentarem padrões distintos.

## Conclusão

Este capítulo descreve a RNA desenvolvida para localizar falhas em LTs a partir da decomposição harmônica da corrente de fuga. A RNA utiliza para treinamento o algoritmo de retropropagação resiliente que apresenta-se bastante rápido e converge em poucas épocas. A

rede mostrou um bom desempenho tanto na localização de falhas como na determinação do valor da capacitância geradora da falha. Através destes dados é possível analisar a condição de isolamento dos trechos mais prejudicados de uma LT, podendo, assim, planejar trocas, reparos, enfim a análise destes parâmetros possibilitará uma manutenção preditiva.

## CONCLUSÕES

O estado-da-arte mostrado no capítulo 1 evidencia a imensa quantidade de métodos de localização de faltas em LTs, porém não foi encontrado nenhum trabalho que apresentasse uma metodologia de localização de falhas em LTs, isto é, técnicas de manutenção preditiva quase não estão presentes na literatura.

Este trabalho fez uso de uma RNA para a localização de falhas em linhas de transmissão, tomando como base de dados a decomposição harmônica da corrente de fuga para um dado trecho de LT. Tal linha de raciocínio foi tomada ao observar-se que eram geradas diferentes correntes de fuga quando ocorriam falhas em diferentes trechos da linha, para uma mesma capacitância geradora da falha. Além disto, observou-se que o espectro harmônico da corrente de fuga seguia um dado padrão segundo a capacitância geradora da falha.

Um modelo de LT foi utilizado para gerar dados para o treinamento da RNA. Este é capaz de tratar dados reais de tensão e corrente (harmônicos até a 50ª ordem) obtidos por um analisador instalado nas extremidades da linha e de incorporar dados construtivos R, L, C para o trecho de linha em estudo, podendo-se facilmente alterá-los para que estes contemplem possíveis modificações ambientais em torno da LT. O modelo desenvolvido é uma simplificação, pois apresenta apenas 10 torres e a situação real, trecho Guamá-Utinga, possui 50 torres. Tanto os dados de entrada como os de saída do modelo foram utilizados para alimentar a RNA.

A RNA desenvolvida é relativamente pequena e tem como dados de entrada valores de 41 arquivos contendo as decomposições harmônicas obtidas através do modelo. E suas saídas são vetores de capacitância e localização de falhas.

Bons resultados foram obtidos pela RNA com os dados de teste. O poder de generalização da rede foi verificado utilizando dados que não estavam no treinamento desta. Esta é capaz de localizar a falha e fornecer valores aproximados para a capacitância geradora da falha.

A RNA foi testada, também com sucesso, para dados em condição normal de funcionamento medidos em outros dias, 18/11/05 e 19/11/05. Há um ponto muito sutil entre a situação de falha e a condição normal de funcionamento, pois não existem registros que evidenciem qual é o valor limite para que uma capacitância possa ser considerada um parâmetro de operação normal da LT, também não há registro de valores de capacitâncias na situação de falta. Isto torna a classificação mais difícil. A determinação de tais limites trariam um grande avanço no presente trabalho.

A aquisição de um maior número de arquivos que reproduzem situações de falhas, para um mesmo instante de tempo não melhora significativamente a resposta da rede. Observa-se que um conjunto de 41 decomposições harmônicas já caracteriza a disposição das falhas ao longo do trecho considerado. A aquisição de dados de vários instantes de tempo, isto é dias diferentes em horários diferentes, pode trazer uma quantidade de informação maior para a rede tornando-a, possivelmente, mais abrangente.

Várias arquiteturas de redes foram testadas e observou-se que para algumas arquiteturas a resposta é melhor para falhas em torres iniciais, já para outras um melhor desempenho na localização apresenta-se nas últimas torres. A arquitetura 40-40-40-2 foi mostrada, pois apresenta comportamento satisfatório em quase todas as torres do trecho.

Foram testados vários valores diferentes para a meta da rede. Um bom valor de meta encontrado foi de 0,1. Valores muito menores que este quase sempre acarretavam em sobre-treinamento da rede, diminuindo o seu poder de generalização. Utilizando a meta de 0,1 as saídas para os dados de treinamento não eram tão precisas, mas o conjunto de dados de teste apresentava-se melhor do que quando treinado com uma meta menor.

O método aqui mostrado para a localização de falhas em LT é apenas um protótipo e não tem o intuito de ser diretamente aplicável às linhas em funcionamento. Sabe-se que são necessários muitos estudos e aprimoramentos para que a RNA aqui apresentada possa

conclusivamente localizar falhas. Porém através deste trabalho vê-se a real possibilidade de localizar falhas e saber, através da capacitância geradora da falha, a condição de isolamento de uma linha de transmissão utilizando uma idéia conceitualmente diferente e inovadora. A determinação da localização e da capacitância geradora da falha é muito importante para futuramente se predizer uma falta em uma LT.

### **Continuidade da Pesquisa**

Em trabalhos futuros pode-se considerar conjuntos de dados de treinamento que contemplem vários dias e horários diferentes, analisando assim possíveis influências de condições climáticas sobre a localização de falhas em LTs. Neste sentido está sendo desenvolvido um trabalho de pesquisa financiado pela ELETRONORTE denominado “Monitoração On-line de Linhas de Transmissão – MOLLTS”. Outros trabalhos podem ainda abordar o desenvolvimento de uma RNA híbrida que possa juntar conhecimento de duas ou três RNAs distintas que apresentem resultados melhores no início, meio e fim da linha, isto pode trazer uma melhora significativa na localização. Outra proposta seria a melhoria do modelo através da introdução das 50 torres referentes ao trecho Guamá-Utinga ou ainda, modelar o isolador através de uma capacitância com uma resistência em paralelo, considerando problemas resistivos nos isoladores.

## REFERÊNCIAS

- [1] OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V.; AGGARWAL, R. K. O Emprego de Redes Neurais Artificiais na Detecção, Classificação e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão. **Revista Controle & Automação**, v. 14, n. 2, p. 138-150, abr/mai/jun, 2003.
- [2] PERREIRA, C. E. M.; ZANETTA JR, L. C. Análise Comparativa de Alguns Algoritmos de Localização Digital de Faltas em Linhas de Transmissão. **SBA Controle & Automação**, v. 11, n.3, p. 135 – 140, set/out/nov/dez, 2000.
- [3] BETTIOL, A. L.; LIRA, R.; DECKER, I. C.; ZIMATH, S. L. Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Usando Medição Fasorial Sincronizada. **XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE**, Curitiba, outubro, 2005.
- [4] ARRUDA, G. A. G. Localizador de Faltas com Dados de Dois Terminais: Implementação e Resultados Práticos. **VIII Seminário Técnico de Proteção e Controle - STPC**, Rio de Janeiro, artigo No. ST-20, jun/jul, 2005.
- [5] FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- [6] ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005.
- [7] HEDMAN, D. E. **Coordenação de Isolamento**. Trad. KACHELER, J. W. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1979.
- [8] TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUCHI, T. A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I – Fourier Transformation Method. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, v.PAS – 100, n. 3, p. 1316-1322, março, 1981.
- [9] TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUCHI, T. A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part II – Laplace Transform Method. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, v.PAS – 101, n. 3, p.564-573, março, 1982.
- [10] TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T. Development of a New Type Fault Locator Using the One-terminal Voltage and Current Data. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, v.PAS – 101, n.8, p.2892-2898, agosto, 1982.
- [11] RICHARDS, G. G.; TAN, O. T. An Accurate Fault Location for Transmission Lines. **IEEE Transaction on Power Apparatus and System**, v. PAS-101, n. 4, p. 945-949, abril, 1982.
- [12] ERIKSSON, L.; SAHA, M. M.; ROCKFELLER, G. D. An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting

- from Remote-End Infeed. **IEEE Transaction on Power Apparatus and System**, v. PAS-104, n. 2, p. 424-436, fevereiro, 1985.
- [13] JOHNS, A. T.; JAMALI, S. Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines. **IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, v. 137, n.06, p.395 – 402, novembro, 1990.
- [14] GIRGIS, A. A.; HART, D. G.; PETERSON, W. L. A New Fault Technique for Two and Three-Terminal Lines. **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 7, n. 1, p. 98-107, janeiro, 1992.
- [15] AGGARWAL, R. K.; COURRY, D. V.; JOHNS, A. T.; KALAM, A. A Practical Approach to Accurate Fault Location on Extra High Voltage Teed Feeders. **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 8, n. 3, p. 874-883, julho, 1993.
- [16] GALE, P. F.; CROSSLEY, P. A.; BINGYIN, X.; YAOZHONG, G.; CORY, B. J.; BARKER, J. R. G. Fault Location Based on Traveling Waves. **Developments on Power system Protection, Fifth International Conference**, p. 54-59, 1993.
- [17] DA SILVA, M.; OLESKOVICZ, M.; COURRY, D. V. Aplicação da Transformada Wavelet ao Problema de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão com Três Terminais. **VI Seminário Brasileiro Sobre Qualidade de Energia Elétrica – SBQEE**, artigo no. 027575, Belém, 2005.
- [18] ALTERNATIVE Transients Program. Rule Book, Leuven EMTP Center (LEC), 1987.
- [19] YANG, H. T.; CHANG, W. Y.; HUANG, C. L. A New Network Approach to On-line Fault Section Estimation Using Information of Protective Relays and Circuit Breakers. **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 9, n. 1, p. 220-229, janeiro, 1994.
- [20] PURUSHOTHAMA, G. K.; NARENDRANATH, A. U.; THUKARAM, D.; PARTHASARATHY, K. ANN Application in Fault Locators. **ELSEVIER – Electrical Power and Energy Systems**, v. 23, p. 491-506, 2001.
- [21] GOES, E. A.; RODRIGUES, J. F.; DA SILVA, I. N. Uma abordagem baseada em redes neurais artificiais para a identificação de trechos submetidos a curtos-circuitos em sistema de distribuição. **XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE**, Campinas, outubro, 2001.
- [22] RAMOS, M. A.; VELLASCO, M. M.; PACHECO, M. A. Sistema de Identificação e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseado em Redes Neurais. **XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE**, Uberlândia, outubro, 2003.
- [23] GIOVANINI, R.; COURRY, D. V. Um Novo Método para Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão Baseado em Reconhecimento de Padrões. **XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE**, Foz do Iguaçu, outubro, 1999.

- [24] FAHLAMAN, S. E. The Cascade Correlation Learning Architecture. *Adv Neural Inflation Proc Syst*, 1990.
- [25] MATLAB, The Language of Technical Computing, The MathWorks Inc., version 5.2, Natick, Massachusetts, 1998.
- [26] NEURAL Works Professional II / PLUS. Version 5.23 NEURALWARE, a subsidiary of Aspen Technology, Inc.
- [27] WEDEPOHL, L. M. Application of Matrix Methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase system. *IEE*, v. 110, n. 12, p. 2200-2212, 1963.
- [28] MARTÍ, J. R. Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transients Simulations. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-101, n. 1, p. 147-157, janeiro, 1982.
- [29] CASTELLANOS, F.; MARTÍ, J. Phase-domain Multiphase Transmission Line Models. *Proceedings of IPST'95 – International Conference on Power Systems Transients*, p. 17-22, 1995.
- [30] NODA, T.; NAGAOKA, N.; AMETANI, A. Phase Domain Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines by Means of an ARMA Model. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. PWRD-11, n. 1, p. 401-411, 1996.
- [31] NODA, T.; NAGAOKA, N.; AMETANI, A. Further Improvements to a Phase-Domain ARMA Line Modeling Terms of Convolution, Steady-State Initialization and Stability. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 12, n. 3, p. 1327-1334, 1997.
- [32] CASTELLANOS, F.; MARTÍ, J.; MARCANO, F. Phase-Domain Multiphase Transmission Line Models. *Electrical Power & Energy Systems*, v. 19, n. 4, p. 241-248. Elsevier Science Ltd, 1997.
- [33] MARCANO, F.; MARTÍ, J. Idempotent Line Model: Case Studies. *Proceedings of IPST'97 – International Conference on Power Systems Transients*, p. 62-72, 1997.
- [34] CASTELLANO, F.; MARTÍ, J. Full Frequency-Dependent Phase-Domain Transmission Line Model. *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 12, n. 3, p. 1331-1339, 1997.
- [35] DOMMEL, H. W. Electromagnetic Transients Program Reference Manual, Department of Electrical Engineering – The University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 1996.
- [36] MORCHED, A.; GUSTAVSEN, B.; TARTIBI, M. A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 14, Issue 3, p. 1032-1038, 1999.

- [37] YU, T. C.; MARTÍ, J. Zcable Model for Frequency Dependent Modelling of Cable Transmission System, **Proceedings of IPST'01 – International Conference on Power System Transients**, 2001.
- [38] FERNANDES, A. B.; NEVES, W. L. A. Frequency-Dependent Transformation Matrices for Phase-Domain Transmission Line Models. **IEEE Summer Power Meeting 2001**, p. 1782-1787, Vancouver, 2001.
- [39] FERNANDES, A. B. **Linhas de Transmissão: Um Modelo no Domínio de Fases Preciso e Eficiente**. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.
- [40] GUSTAVSEN, B.; IRWIN, G.; MANGELROD, R.; BRANDT, D.; KENT, K. Transmission Lines Models for Simulation of Interaction Phenomena between AC and DC Overhead Lines. **IPST'99 – International Conference on Power Systems Transients**, p.61-67, Budapeste, 1999.
- [41] GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. Combined Phase and Modal Domain Calculation of Transmission Line Transient Based on Vector Fitting. **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 13, n. 2, p. 596-604, 1998.
- [42] MARTÍ, L. Simulation of Transients in Underground Cables with Frequency-Dependent Modal Transformation Matrices, **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 3, n.3, p. 1099-1110, 1988.
- [43] GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. Simulation of Transmission Line Transients Using Vector Fitting and Modal Decomposition. **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 13, Issue 2, p. 605-614, 1998a.
- [44] CORREA S. M. **Análise de Elementos Finitos para Determinação da Capacitância de Linhas de Transmissão**. 2003. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.
- [45] VIEIRA JUNIOR, P.; CORREA, S. M.; GOMES, C. R.; GOMES JUNIOR, L. A. Determinação da Capacitância de Sistemas de Transmissão de Energia Utilizando o Método dos Elementos Finitos. **VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais – INDUSCON**, Recife, abril, 2006.
- [46] MODEL 1133A POWER SENTINEL. Operational Manual, Arbiter Systems Incorporated, 1999.
- [47] HAYKIN, S. **Redes Neurais: princípios e pratica**. 2ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- [48] REIDMILLER, M.; BRAUM, H. A Direct Adaptative Method for Faster Backpropagation Learning: The RPROP Algorithm. **IEEE International Conference on Neural Networks**, São Francisco, 1993.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A: Rotina de Validação do Modelo Pi

Descrição: Rotina feita em Matlab que subtrai os valores de corrente, fase A, das subestações Guamá e Utinga para validar o modelo Pi. Após a subtração é gerada a forma de onda desta subtração que corresponde à corrente de fuga.

```
load SGUAM15.TXT
load SUTI15.TXT
op=1;
z1=SGUAM15;
z2= SUTI15;
g=0.01745329251994;
mz1=z1(:,1);
fz1=z1(:,2);
xz1=mz1.*cos(g*fz1);
yz1=mz1.*sin(g*fz1);

mz2=z2(:,1);
fz2=z2(:,2);
xz2=mz2.*cos(g*fz2);
yz2=mz2.*sin(g*fz2);

r1=xz2+op*xz1;
r2=yz2+op*yz1;
mag=sqrt(r1.*r1+r2.*r2);
fase=angle(r1+i*r2);
n=max(size(fase));
%mnor=mag/mag(1);
t= 1:0.0001:2;
sg=0;
cont=0;
for k =1:n
    cont=cont+1;
    omega=2*pi*cont*60;
    s=mag(k).*sin(fase(k)+omega*t);
    sg=sg+s;
    %plot(t,s); hold on
end

plot(t,sg)
axis([1 1.03 -0.2 0.2])
```

## APÊNDICE B: Tratamento de Dados.

Rotina 1:

Descrição: Rotina feita em Matlab que toma os dados das três fases (magnitude e fase) de corrente fornecidos pelo analisador Power Sentinel 1133A e transforma-os em forma de onda.

```
%corrguama.m - função para gerar harmonicos de corrente
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
%-----
% Sintaxe: [Ia_mat, Ib_mat, Ic_mat] = corr(VI)
% Entrada:
% VI -> arquivo de dados contendo amplitudes e fases de tensão e corrente
% das tres fases.
%
% Saida
% ia_guama.mat -> Fonte de corrente para Fase A
% ib_guama.mat -> Fonte de corrente para Fase B
% ic_guama.mat -> Fonte de corrente para Fase C
%-----
function [Ia_gua, Ib_gua, Ic_gua] = corrguama(VI)

Ia = VI(1,[101:200]); Ib = VI(1,[301:400]); Ic = VI(1,[501:600]);
[l c] = size(Ia);
cont1=0; format long
for k = 1:2:(c-1)
    cont1=cont1+1;
    FFa(cont1,1) = Ia(k);
    phia(cont1,1) = Ia(k+1); %--> Fase em graus

    FFb(cont1,1) = Ib(k);
    phib(cont1,1) = Ib(k+1); %--> Fase em graus

    FFc(cont1,1) = Ic(k);
    phic(cont1,1) = Ic(k+1); %--> Fase em graus
end

clear l c k;
[l c]=size(FFa);
for k =1:l
w(k,1) = 2*pi*60*k; %--> frquencia angular
phirad_a(k,1) = (2*pi*phia(k))/360; %--> Fase em radianos
phirad_b(k,1) = (2*pi*phib(k))/360; %--> Fase em radianos
phirad_c(k,1) = (2*pi*phic(k))/360; %--> Fase em radianos
end
clear k;
```

```

cont = 0;
for t = 0:0.00001:0.132;
    cont = cont + 1; %--> contador
    for k = 1:l
        Fa(k) = FFa(k)*sin(w(k)*t+phirad_a(k));
        Fb(k) = FFb(k)*sin(w(k)*t+phirad_b(k));
        Fc(k) = FFc(k)*sin(w(k)*t+phirad_c(k));
        ia(cont) = sum(Fa);
        ib(cont) = sum(Fb);
        ic(cont) = sum(Fc);
    end
end
t = 0:0.00001:0.132;

mata = [t,ia']; matb = [t,ib']; matc = [t,ic'];
Ia_gua = mata'; Ib_gua = matb'; Ic_gua = matc';

save ia_guama Ia_gua
save ib_guama Ib_gua
save ic_guama Ic_gua

%figure(2)
plot(t,ia, 'b-');
grid on;
title('Corrente na linha das FASES A B C');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Corrente (A)');

hold on;
plot(t,ib, 'r-');
plot(t,ic, 'k-');
legend ('Corrente A','Corrente B','Corrente C')
hold off;

```

Rotina 2:

Descrição: Rotina feita em Matlab que toma os dados das três fases (magnitude e fase) de tensão fornecidos pelo analisador Power Sentinel 1133A e transforma-os em forma de onda.

```
%tensguama.m - função para gerar harmônicos
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
%-----
% Sintaxe: [Va_mat, Vb_mat, Vc_mat] = tensguama(VI)
% Entrada:
% VI -> arquivo de dados contendo amplitudes e fases de tensão e corrente
% das três fases.
%
% Saida
% va_guama.mat -> Fonte de tensão para Fase A
% vb_guama.mat -> Fonte de tensão para Fase B
% vc_guama.mat -> Fonte de tensão para Fase C
%-----
function [Va_gua, Vb_gua, Vc_gua] = tensguama(VI)

Va = VI(1,[1:100]); Vb = VI(1,[201:300]); Vc = VI(1,[401:500]);
[l c] = size(Va);
cont1=0; format long
for k = 1:2:(c-1)
    cont1=cont1+1;
    FFa(cont1,1) = Va(k);
    phia(cont1,1) = Va(k+1); %--> Fase em graus

    FFb(cont1,1) = Vb(k);
    phib(cont1,1) = Vb(k+1); %--> Fase em graus

    FFc(cont1,1) = Vc(k);
    phic(cont1,1) = Vc(k+1); %--> Fase em graus
end

clear l c k;
[l c]=size(FFa);
for k =1:l
    w(k,1) = 2*pi*60*k; %--> frequência angular
    phirad_a(k,1) = (2*pi*phia(k))/360; %--> Fase em radianos
    phirad_b(k,1) = (2*pi*phib(k))/360; %--> Fase em radianos
    phirad_c(k,1) = (2*pi*phic(k))/360; %--> Fase em radianos
end
clear k;

cont = 0;
```

```

for t = 0:0.00001:0.132;
    cont = cont + 1; %--> contador
    for k = 1:l
        Fa(k) = FFa(k)*sin(w(k)*t+phirad_a(k));
        Fb(k) = FFb(k)*sin(w(k)*t+phirad_b(k));
        Fc(k) = FFc(k)*sin(w(k)*t+phirad_c(k));
        va(cont) = sum(Fa);
        vb(cont) = sum(Fb);
        vc(cont) = sum(Fc);
    end
end
t = 0:0.00001:0.132;

mata = [t,va']; matb = [t,vb']; matc = [t,vc'];
Va_gua = mata'; Vb_gua = matb'; Vc_gua = matc';

save va_guama Va_gua
save vb_guama Vb_gua
save vc_guama Vc_gua

%figure(1)
plot(t,va, 'b-');
grid on;
title('Tensao na linha das FASES A B C');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tensão (V)');

hold on;
plot(t,vb, 'r-');
plot(t,vc, 'k-');
legend ('Tensão A','Tensão B','Tensão C')
hold off;

```

## Rotina 3:

Descrição: Gera as figuras contendo as formas de onda de tensão e corrente das três fases geradas pelas rotinas anteriores.

```
%mainVIguama.m - Programa para Gerar os Sinais de entrada para a simulação do
%modelo matemático.
%-----
% Universidade Federal do Para
% Centro Tecnológico - PPGEE
% Grupo de Pesquisa em Linha de Transmissão - GPLT
%-----
% Entrada:
% harm_gua_17_11_05 -> arquivo de dados contendo amplitudes e fases de
% tensão e corrente das três fases.
%
% Dados do dia 17/11/2005 as 15:00:00 - harm_gua_17_11_05
% Saída:
% Tensão e Corrente Trifásica
%-----

% LEITURA DOS DADOS DE CAMPO
load harm_gua_17_11_05.txt
VI = harm_gua_17_11_05;
% GERAÇÃO DAS FONTES DE TENSÕES
subplot(2,1,1); %figure(1)
[Va_gua, Vb_gua, Vc_gua] = tensguama_modf(VI);
hold on;
subplot(2,1,2); %figure(2)
[Ia_gua, Ib_gua, Ic_gua] = corrguama_modf(VI);
hold off;
```

**APÊNDICE C: Saída em formato texto fornecida pelo modelo Pi.**

%Este arquivo contem a saída do modelo trifásico para a capacitância  $c1 = 2.7481e-10$  e para torre 1.

|               |        |
|---------------|--------|
| 120 Hz (h2)   | 0.09 % |
| 180 Hz (h3)   | 2.29 % |
| 240 Hz (h4)   | 0.23 % |
| 300 Hz (h5)   | 7.95 % |
| 360 Hz (h6)   | 0.30 % |
| 420 Hz (h7)   | 6.78 % |
| 480 Hz (h8)   | 2.40 % |
| 540 Hz (h9)   | 0.56 % |
| 600 Hz (h10)  | 0.25 % |
| 660 Hz (h11)  | 0.31 % |
| 720 Hz (h12)  | 0.23 % |
| 780 Hz (h13)  | 0.47 % |
| 840 Hz (h14)  | 0.18 % |
| 900 Hz (h15)  | 0.14 % |
| 960 Hz (h16)  | 0.31 % |
| 1020 Hz (h17) | 0.51 % |
| 1080 Hz (h18) | 0.54 % |
| 1140 Hz (h19) | 0.31 % |
| 1200 Hz (h20) | 0.37 % |
| 1260 Hz (h21) | 0.52 % |
| 1320 Hz (h22) | 0.43 % |
| 1380 Hz (h23) | 0.56 % |
| 1440 Hz (h24) | 0.60 % |
| 1500 Hz (h25) | 0.65 % |
| 1560 Hz (h26) | 0.73 % |
| 1620 Hz (h27) | 0.79 % |
| 1680 Hz (h28) | 0.63 % |
| 1740 Hz (h29) | 0.86 % |
| 1800 Hz (h30) | 1.08 % |
| 1860 Hz (h31) | 1.09 % |
| 1920 Hz (h32) | 1.28 % |
| 1980 Hz (h33) | 1.11 % |
| 2040 Hz (h34) | 1.03 % |
| 2100 Hz (h35) | 1.89 % |
| 2160 Hz (h36) | 1.36 % |
| 2220 Hz (h37) | 1.54 % |
| 2280 Hz (h38) | 1.43 % |
| 2340 Hz (h39) | 1.61 % |
| 2400 Hz (h40) | 2.34 % |
| 2460 Hz (h41) | 1.56 % |
| 2520 Hz (h42) | 2.19 % |
| 2580 Hz (h43) | 1.71 % |
| 2640 Hz (h44) | 1.71 % |
| 2700 Hz (h45) | 1.60 % |

|               |        |
|---------------|--------|
| 2760 Hz (h46) | 2.29 % |
| 2820 Hz (h47) | 2.24 % |
| 2880 Hz (h48) | 2.32 % |
| 2940 Hz (h49) | 2.37 % |