UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

UMA ABORDAGEM BASEADA EM REDE NEURAL ARTIFICIAL PARA LOCALIZAÇÃO DE TRECHO DE LINHA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CURTO - CIRCUITO

EDISON APARECIDO GOES

BAURU - SP
Maio - 2001

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

UMA ABORDAGEM BASEADA EM REDE NEURAL ARTIFICIAL PARA LOCALIZAÇÃO DE TRECHO DE LINHA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CURTO-CIRCUITO

EDISON APARECIDO GOES

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

BAURU - SP
Maio - 2001

(A)

Nº CAPES 3.04.04.02-9
Transmissão de energia elétrica, distribuição da energia elétrica
Unidade: Linhas de distribuição de energia elétrica. Redes neurais artificiais.

Número de chamada
Clas. T/UNESP
PHA G 543u
Tombo n.º 943

BIBLIOTECA - UNESP - CAMPUS BAURU

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

UMA ABORDAGEM BASEADA EM REDE NEURAL ARTIFICIAL PARA LOCALIZAÇÃO DE TRECHO DE LINHA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CURTO-CIRCUITO

EDISON APARECIDO GOES

Orientador: Prof. Dr. José Francisco Rodrigues

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

BAURU - SP
Maio - 2001

Ficha catalográfica elaborada por
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - Bauru

Goes, Edison Aparecido
Uma abordagem baseada em rede neural artificial para localização de trecho de linha de distribuição de energia elétrica em curto-circuito / Edison Aparecido Goes - - Bauru : [s.n.], 2001.
128 f.

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

Orientador: Prof. Dr. José Francisco Rodrigues

1. Localização de falta. 2. Redes neurais artificiais. 3. Linhas de distribuição de energia elétrica. I – Título. II – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.

PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA INDUSTRIAL

ATA Nº 011/2001.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE *EDISON APARECIDO GOES*, ALUNO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNESP – CAMPUS DE BAURU.

No dia trinta e um de maio de dois mil e um, às quatorze horas, no anfiteatro do prédio da pós-graduação da Faculdade de Engenharia da UNESP, Câmpus de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos Professores Doutores: José Francisco Rodrigues do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia - UNESP – Câmpus de Bauru, Presidente da Banca, Ivan Nunes da Silva do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia – UNESP – Câmpus de Bauru e Luís Carlos Origa de Oliveira do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia – UNESP – Câmpus de Ilha Solteira, a fim de proceder a argüição pública da Dissertação de Mestrado do candidato ***Edison Aparecido Goes***, intitulada "UMA ABORDAGEM BASEADA EM REDE NEURAL ARTIFICIAL PARA LOCALIZAÇÃO DE TRECHO DE LINHA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM CURTO CIRCUITO". O Professor Doutor José Francisco Rodrigues, Presidente da Banca, apresentou o candidato, que dissertou sobre seu trabalho, em trinta minutos, após, o candidato foi argüido oralmente pelos membros componentes da Comissão Examinadora no tempo regulamentar exigido. Logo após, reuniu-se a Comissão Examinadora, tendo apresentado o conceito final: **APROVADO**, atribuindo a menção ***com distinção e louvor.*** Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após, lida e aprovada, será assinada pelos Senhores Membros da Comissão Examinadora. Bauru, trinta e um de maio de dois mil e um. / . /

Prof. Dr. José Francisco Rodrigues - Presidente _____

Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva - membro _____

Prof. Dr. Luís Carlos Origa de Oliveira - Membro _____

unesp
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia - Bauru
Av.Engº Luiz Edmundo Carrijo Coube s/nº • Caixa Postal 473 • CEP 17 033-360 • Bauru • SP • Fone: 14 221 6000 e 14 221 6108 • Fax: 14 221 6104
E-mail: spg-fe@bauru.unesp.br • home page: www.bauru.unesp.br/pos/fe.htm

Dedico este trabalho à minha esposa Vanda e aos meus filhos Thiago e Camila pela ajuda e compreensão nas horas mais difíceis, nas quais estiveram sempre juntos, dando todo apoio para atingir este objetivo e também aos meus pais Maria e Ivo que desde o início me educaram no caminho da seriedade e compromisso.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças as bençoes de Jesus Cristo e a intercessão de sua mãe, a bem-aventurada Virgem Maria, e a colaboração direta ou indireta de várias pessoas, particularmente:

a minha esposa Vanda e aos meus filhos Thiago e Camila, pela compreensão, carinho e ajuda;

ao Prof. José Francisco Rodrigues, orientador, que colaborou para que a proposta apresentada atingisse o objetivo - meus sinceros agradecimentos;

a Profª. Maria Cristina Tavares e ao hoje Engº Paulo Guidetti, da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, meu especial agradecimento, pois através do apoio no uso do ATP, que o trabalho começou;

a Cassia, Djanira, Maria, Yara, Regina e demais funcionários que de uma forma ou de outra me atenderam com solicitude - sinceros agradecimentos a todos;

aos Profs. do DEE - UNESP, pelo espírito de colaboração e profissionalismo sempre que precisei - meus sinceros agradecimentos;

ao Prof. José Luiz, do departamento de Matemática - UNESP, pela atenção e disponibilidade em ajudar - muito obrigado;

aos Profs. Capello e Bento do DEM, e ao Prof. Osvaldo do DEC, por sempre estarem disponíveis quando precisei - meus sinceros agradecimentos;

aos meus amigos, Profs. Edvaldo Assunção e Carlos A. Alves, do DEE, UNESP - Ilha Solteira, meus sinceros e eternos agradecimentos;

ao Engº. Mario Piotto, da CTEEP e Engº Mauro A. Pereira da ELEKTRO, pelas idéias e colaborações no inicio dos trabalhos - muito obrigado;

a todos os alunos do LSEE, do curso de pós-graduação e doutorado da USP, campus de São Carlos, em especial ao Mário, meus sinceros agradecimentos;

ao Elenilton, do Laboratório de Eletrônica Embarcada, da EESC, pela ajuda e colaboração no desenvolvimento inicial do trabalho - meus agradecimentos;

ao Prof. Ruy Altafim, da EESC, pela autorização do uso do LSEE - meus agradecimentos;

aos funcionários da ELEKTRO, em especial a Ana, o Rogério e o Valmir, pelos dados utilizados na configuração estudada - meus agradecimentos;

A todos colegas da pós-graduação da UNESP - meus agradecimentos.

Ao Prof. Ivan, da disciplina de Redes Neurais, meu muito obrigado.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Disse Jesus: O ramo não pode dar fruto por si mesmo, se não permanecer na videira. Assim também vós: não podeis tampouco dar fruto, se não permanecerdes em Mim. Eu sou a videira vós os ramos. Quem permanecer em Mim e Eu nele, esse dá muito fruto; ***porque sem Mim nada podeis fazer.***

Jo 15, 4-5

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS 9

LISTA DE TABELAS 12

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS 14

Resumo 16

Abstract 17

CAPÍTULO 1. Introdução

1.1 Relevância e motivação do trabalho 18

1.2 Revisão da literatura 20

1.3 Justificativas e contribuições 24

1.4 Organização da dissertação 27

CAPÍTULO 2. Sistema elétrico de potência - SEP

2.1 Importância do SEP 28

2.2 Partes de um SEP 30

2.3 Tipos de faltas nos SEPs 33

2.4 Ocorrências de defeitos no SEP 34

2.5 Ocorrências de tipos de curtos-circuitos no SEP 35

2.6 Ocorrências de curtos-circuitos permanente e temporário 35

2.7 Localização de faltas no sistema elétrico de potência 36

2.8 Ocorrências de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica 44

2.9 Dispositivos de proteção utilizados nas linhas de distribuição 44

CAPÍTULO 3. Redes Neurais Artificiais

3.1 Introdução 53

3.2 Neurônio biológico 54

3.3 Neurônio booleano de McCulloch 59

3.4 Arquiteturas de redes neurais artificiais 63

3.5 Processo de aprendizagem..... 66
3.6 Algoritmos de treinamento da rede perceptron..... 67

CAPÍTULO 4. Simulações no sistema elétrico
4.1 Introdução..... 77
4.2 Configuração utilizada no estudo..... 79
4.3 Parâmetros do sistema elétrico de potência..... 83
4.4 Metodologia utilizada..... 86

CAPÍTULO 5. Resultados das simulações..... 97

CAPÍTULO 6. Conclusões..... 119

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 122

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Seqüência mostrando a obtenção de energia elétrica.	29
Figura 2.2 -	Partes constituintes de um sistema elétrico de potência	30
Figura 2.3 -	Custos de transmissão em função do nível de tensão, comprimento e potência da linha.	31
Figura 2.4 -	Gráfico para determinação do nível econômico de tensão.	32
Figura 2.5 -	Configurações dos tipos de faltas com impedância no SEP.	33
Figura 2.6 -	Partes constituintes de um localizador de faltas.	40
Figura 2.7 -	Esquema de um circuito *sample and hold*.	42
Figura 2.8 -	Esquema de um processo de amostragem de sinais.	42
Figura 2.9 -	Religador (RL) em série com um seccionalizador (SL).	47
Figura 2.10 -	Circuito eletrônico de terra (5A) de um circuito seccionalizador.	48
Figura 2.11 -	Fluxograma do funcionamento de um relé de sobrecorrente secundário com elemento instantâneo (50) e um temporizado (51).	49
Figura 2.12 -	Relé microprocessado com *sample and hold* individual.	51
Figura 2.13 -	*Hardware* básico para relé microprocessado.	52
Figura 3.1 -	Esquema simplificado de um neurônio.	55
Figura 3.2 -	Esquema simplificado de uma conexão sináptica.	56
Figura 3.3 -	Representação esquemática do aprendizado supervisionado.	57
Figura 3.4.-	Representação esquemática do aprendizado não supervisonado.	58
Figura 3.5 -	Esquema de um neurônio.	59
Figura 3.6 -	Modelo do neurônio artificial.	60
Figura 3.7 -	Função de ativação tipo degrau.	61
Figura 3.8 -	Função de ativação tipo sigmóide.	62

unesp

Figura 3.9 - Função de ativação tipo tangente hiperbólica. 62

Figura 3.10 - Função de ativação rampa simétrica 63

Figura 3.11 - Arquitetura *perceptron* com uma camada escondida. 64

Figura 3.12 - Arquitetura *feedforward* com duas camadas escondidas. 65

Figura 3.13 - Rede recorrente típica. 66

Figura 3.14 - Diagrama esquemático da rede *perceptron*. 68

Figura 4.1 - Configuração do sistema de distribuição utilizado. 79

Figura 4.2 - Poste de sustentação dos condutores. 80

Figura 4.3 - Silheta do poste com as respectivas medidas. 80

Figura 4.4 - Elemento de uma linha representada por parâmetros distribuídos. 83

Figura 4.5 - Arquivo de dados da rotina *line constants*. 84

Figura 4.6 - Configuração da linha de distribuição modelada para uso do ATP. 85

Figura 4.7 - Fluxograma da metodologia utilizada. 88

Figura 4.8 - Formas de ondas das tensões medidas na barra *P* para uma situação de regime permanente. 89

Figura 4.9 - Formas de ondas das tensões medidas na barra *Q* para uma situação de regime permanente. 89

Figura 4.10 - Formas de ondas das tensões medidas na barra *R* para uma situação de regime permanente. 90

Figura 4.11 - Formas de ondas das correntes medidas na barra *P* para uma situação de regime permanente. 90

Figura 4.12 - Formas de ondas das tensões medidas na barra *P* para uma situação de falta fase *A* para terra no trecho *P-T*. 91

Figura 4.13 - Formas de ondas das tensões medidas na barra *Q* para uma situação de falta fase *A* para terra no trecho *P-T*. 92

Figura 4.14 - Formas de ondas das tensões medidas na barra *R* para uma situação de falta fase *A* para terra no trecho *P-T*. 92

Figura 4.15 - Formas de ondas das correntes medidas na barra *P* para uma situação de falta fase *A* para terra no trecho *P-T*. 93

Figura 4.16 - Resposta em freqüência de um filtro TDF. 95

Figura 5.1 - Fluxograma das etapas desde as simulações até a avaliação do desempenho da RNA. 98
Figura 5.2 - Quadrado da magnitude para o filtro Butterworth contínuo no tempo. 100
Figura 5.3 - Curvas das respostas da amplitude do filtro Butterworth para diferentes ordens. 100
Figura 5.4 - Curvas de atenuação dos filtros Butterworth para diferentes ordens. 101
Figura 5.5 - Gráfico das características dos filtros passa-baixa. 102
Figura 5.6 - Gráfico das curvas de resposta em frequencia e ângulo de fase do filtro Butterworth utilizado. 105
Figura 5.7 - Forma de onda da tensão da fase *A*, medida na barra *Q* devido um curto-circuito da mesma fase para terra, no trecho *P-T*. 106
Figura 5.8 - Forma de onda do mesmo sinal da figura anterior, filtrada pelo filtro Butterworth especificado. 106
Figura 5.9 - Espectro de freqüência da forma de onda da tensão mostrada na Figura 5.7. 107
Figura 5.10 - Espectro de freqüência da forma de onda da tensão mostrada na Figura 5.8. 107
Figura 5.11 - Gráfico do desenvolvimento da RNA durante o treinamento. 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Porcentagem de ocorrências de cada parte do SEP no curto-circuito. 35

Tabela 2.2 - Porcentagem de ocorrências dos tipos de curtos-circuitos. 35

Tabela 2.3 - Ocorrências dos curtos-circuitos permanentes e temporários. 36

Tabela 4.1 - Grandezas medidas durante as simulações. 81

Tabela 4.2 - Valores das cargas conectadas no sistema. 82

Tabela 4.3 - Arquivo das correntes amostradas para uma falta no trecho *P-T*, destacando-se o ponto de transição de pré-falta para pós-falta. 94

Tabela 5.1 - Coeficientes 'As' do filtro especificado. 103

Tabela 5.2 - Coeficientes 'Bs' do filtro especificado. 104

Tabela 5.3 - Parte de um arquivo destacando-se o aumento do valor da corrente da fase *A* e amostras de pré e pós-falta. 108

Tabela 5.4 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T*- distância: 0.35 km da barra *P* - desejado: **1 0 0**. 110

Tabela 5.5 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T*- distância: 0.56 km da barra *P* - desejado **1 0 0**. 111

Tabela 5.6 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T*- distância: 2.33 km da barra *P* - desejado **1 0 0**. 111

Tabela 5.7 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T*- distância: 7.0 km da barra *P* - desejado **1 0 0**. 111

Tabela 5.8 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T*- distância: 13.50 km da barra *P* - desejado **1 0 0**. 112

Tabela 5.9 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T*- distância: 15.80 km da barra *P* - desejado **1 0 0**. 112

Tabela 5.10- Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q* distância: 0.85 km da barra *T* - desejado **0 1 0**. 112

unesp

Tabela 5.11 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q* distância: 3.5 km da barra *T* - desejado **0 1 0**. 113
Tabela 5.12 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q* distância: 8.0 km da barra *T* - desejado **0 1 0**. 113
Tabela 5.13 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q* distância: 16.45 km da barra *T* - desejado **0 1 0**. 113
Tabela 5.14 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q* distância: 22.50 km da barra *T* - desejado **0 1 0**. 114
Tabela 5.15 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q* distância: 23.8 km da barra *T* - desejado **0 1 0**. 114
Tabela 5.16- Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R* distância: 0.74 km da barra *T* - desejado **0 0 1**. 114
Tabela 5.17 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R* distância: 4.7 km da barra *T* - desejado **0 0 1**. 115
Tabela 5.18 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R* distância: 7.0 km da barra *T* - desejado **0 0 1**. 115
Tabela 5.19 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R* distância: 8.2 km da barra *T* - desejado **0 0 1**. 115
Tabela 5.20 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R* distância: 10.0 km da barra *T* - desejado **0 0 1**. 116
Tabela 5.21 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T* distância: 11.6 km da barra *T* - desejado **0 0 1**. 116
Tabela 5.22 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T* sem passar pela função degrau unitário - resposta esperada **1 0 0**. 117
Tabela 5.23 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q* sem passar pela função degrau unitário - resposta esperada **0 1 0**. 117
Tabela 5.24 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R* sem passar pela função degrau unitário - resposta esperada **0 0 1**. 118

LISTA DE ABREVIATURAS

A/D = Analógico/Digital

ABB = Asea Brown Boveri

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACSR = Aluminum Cable Steel Reinforced

ANSI = American National Standard Institute

AT = alta tensão

ATP = Alternative Transient Program

BPA = Bonneville Power Administration

BT = baixa tensão

CA = corrente alternada

CC = corrente contínua

CESP = Companhia Energética de São Paulo

COD = Centro de Operação de Distribuição

COPEL = Companhia de Eletricidade do Paraná

CPU = Central Processing Unit

CTEEP = Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista

dB = decibel

DFP = Digital Feeder Protection

DPU = Digital Protection Unit

EAT = extra-alta tensão

EMTP = Eletromagnetic Transient Program

EPRI = Electric Power Research Institute

EPROM = Eraseble Programmable Read Only Memory

FDC = fator de distribuição de corrente

FFT = Fast Fourier Transform

Hz = hertz

IEEE = Institute of Electrical and Electronics Engineers

kV = kiloVolt

LEC = Leuven EMTP Center

LPF = low-pass filter

LVQ = learning vector quantization

unesp

MT = média tensão

MUX = multiplexador

PDE = proteção de distância estática

PDP = processamento distribuído e paralelo

PDPS = proteção de distância de fase estática

PDTS = proteção de distância de terra estática

RNA = rede neural artificial

SDEE = Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

SEP = Sistema Elétrico de Potência

SNNS = Stuttgart Neural Network Simulator

S/H = sample and hold

T/D = thickness/diameter

TC = transformador de corrente

TDF = Transformada Discreta de Fourier

TDNN = time-delay neural network

TNA = transient network analyser

TP = transformador de potencial

UBC = University of British Columbia

UET = ultra-extra tensão

UFPR = Universidade Federal do Paraná

UNESP = Universidade Estadual Paulista

UTR = unidade terminal remota

°C = grau Celsius

μP = microprocessador

μm = micrometro

Goes, E.A. Uma abordagem baseada em rede neural artificial para localização de trecho de linha de distribuição de energia elétrica em curto-circuito. Bauru, 2001, 128 f. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho".

RESUMO

A identificação do local de um curto-circuito em uma linha de distribuição de energia elétrica é muito importante para um rápido restabelecimento do suprimento de energia elétrica. Este trabalho mostra a aplicação de uma arquitetura de Rede Neural Artificial (RNA) tipo *perceptron* multicamadas, operando como classificadora de padrões, para identificar um trecho de uma linha de distribuição de energia elétrica, classe 15 kV, submetida a um curto-circuito fase-terra. A configuração utilizada contém três trechos de comprimentos diferentes e as faltas (curtos-circuitos) foram simuladas através do software *Alternative Transient Program* (ATP). O treinamento e os testes de validação foram realizados com o *toolbox* de Redes Neurais Artificiais do *software* Matlab. Foram simuladas 36 faltas para a etapa de treinamento e 18 faltas para etapa de validação do aprendizado. Os sinais amostrados foram tensões e correntes trifásicos. Também foi empregado um filtro *Butterworth*. Os resultados foram válidos, com acerto na ordem de 97% do total das 18 amostras.

Palavras chaves: Localização de falta; Redes neurais artificiais; Linhas de distribuição de energia elétrica

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Goes, E.A. An approach based on artificial neural network for branch location of eletrical energy distribution line in short-circuit. Bauru, 2001, 128 sheet. Master Dissertation. School of Engineering, Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho".

ABSTRACT

The identification of the right location of a short-circuit in the distribuition line is very important in order to restore the power as fast as possible. This work shows an application of Artificial Neural Networks of type multilayers perceptron, operating as pattern classifier for identifying a branch of a distribution line 15 kV class, submitted to a phase-ground short-circuit. The configuration used in this work has three branches of different lengths and the faults (short-circuits) were simulated by Alternative Transient Program (ATP). The training and validation tests were carried out with Matlab's toolbox for Artificial Neural Network. A number of 36 faults for the training and 18 faults for the validation of learning were simulated. Three-Phase voltages and currents sampled signals were used. Also a Butterworth filter was used. The results were valid, with discernment corrects in 97% of the total of 18 samples.

Keywords: Fault location; Artificial Neural Network; Electrical Energy Distribution Lines.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A crescente demanda de energia elétrica no Brasil nas últimas duas décadas, bem como a quantidade e rapidez da informação pelos meios de comunicação e ainda a exigência e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, impôs novos rumos em âmbito nacional, com respeito aos programas de geração, transmissão e principalmente distribuição de energia elétrica.

As concessionárias de energia elétrica, bem como os grandes complexos industriais, também passaram a exigir de suas equipes técnicas constante aprimoramento e atualização tecnológica no sentido de acompanhar a evolução, bem como atender a exigência do mercado. Devido também ao aumento substantivo em complexidade e diversidade do mercado consumidor, o Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem exigido uma considerável atualização e também uma significativa melhoria dos equipamentos de monitoramento, controle e proteção.

Algumas considerações que dizem respeito ao custo da escolha ou não do melhor esquema de monitoramento, controle e proteção podem ser até combatidas,

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

porém, os percentuais envolvidos em um investimento não são exagerados, podendo chegar em média de 2% a 5% do total do projeto global.

Atualmente, devido a escassez de investimento no setor elétrico, é sugerida a economia em equipamentos, controle de qualidade, mão-de-obra, etc. Apesar das economias exigidas, o que não se pode perder de vista é o comprometimento da qualidade que está atrelada aos índices mínimos de confiabilidade e segurança, desejados.

Dentro de um SEP, encontram-se as linhas de distribuição, classe de tensão 15 kV, onde estão a grande maioria dos consumidores. Neste segmento do sistema elétrico, a ocorrência de faltas (curtos-circuitos) é muito grande, principalmente quando das alterações climáticas, tais como, temporais, ventos e épocas de seca principalmente, que neste caso submetem o sistema às conseqüências danosas das queimadas (fogo sob a linha).

No sistema de transmissão, onde a classe de tensão é da ordem de dez ou mais vezes superior ao sistema de distribuição, estes inconvenientes também ocorrem. No entanto, o restabelecimento do fornecimento de energia é mais rápido: primeiro devido a configuração deste; e segundo, para encontrar o ponto da falta, os relés de proteção destas linhas possuem a função localização de faltas. Este equipamento e respectivo algoritmo não é comercializado separado para que sejam utilizados no sistema de distribuição com as devidas adaptações.

Ultimamente, tem-se observado um significativo avanço nas pesquisas, que aplicam sistemas inteligentes na resolução de problemas relacionados aos Sistemas Elétrico de Potência (SEPs). Os sistemas inteligentes utilizam as Redes Neurais Artificiais (RNAs), que é uma metodologia que permite sua aplicação tanto nos SEPs como em várias outras áreas de pesquisa.

Motivado pela portentosa capacidade das RNAs em resolver problemas desta natureza, conforme mostra a literatura e publicações sobre o assunto, surgiu, então, a idéia de aplicar as RNAs como função classificadora de padrões, para classificar um trecho sob falta (localização de trecho em falta), em uma determinada configuração de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE).

A utilização de RNAs conforme já citado é um assunto abrangente e muito atraente.



1.2 REVISÃO DA LITERATURA

Para o embasamento do estudo, passou-se a pesquisar as aplicações das RNAs nos SEPs.

Na proteção diferencial de transformadores de potência, com o objetivo de discriminar a corrente de *inrush* (corrente transitória de magnetização) da corrente de falta interna em um transformador, Zaman & Rahman (1998), utilizaram-se de uma arquitetura de RNA do tipo *perceptron* multicamadas.

Uma outra situação foi a utilização de RNA na detecção da corrente de *inrush* e recomposição da corrente secundária do transformador de corrente, quando envolvido em saturação, conforme publicação apresentada por Pihler et al., (1997).

Em linhas de transmissão a utilização das RNAs como uma alternativa para função de proteção de distância é objetivo de muitas pesquisas. Oleskovicz & Coury (1997), utilizaram uma RNA como classificadora de padrões, na operação de um relé de distância. No trabalho, a RNA implementada reproduz o padrão da correta atuação do relé, frente a situações distintas de operação. Os padrões de treinamento são feitos com a magnitude dos valores trifásicos da tensão e corrente, incluindo a seqüência zero. Os dados referente ao SEP foram gerados através do *software Alternative Transient Program* (ATP), e para formar e treinar as diversas topologias de RNAs utilizou-se o *software Stuttgard Neural Network Simulator* (SNNS).

Uma proposta utilizando RNA tipo *perceptron* multicamadas foi usada por Bretas (1998), com a função de relé direcional em linhas de transmissão. A saída da RNA composta de uma unidade de processamento, deverá estar ativa (valor de função de ativação igual a **1** para faltas à frente e saída igual a **0** para faltas atrás). Desta maneira a RNA discrimina a falta agindo do mesmo modo que um relé direcional.

A adaptação de RNAs, como uma técnica de religamento automático em sistema de transmissão de energia de Extra-Alta Tensão (EAT) foi apresentada por Aggarwal et al., (1994). Os autores utilizaram uma RNA tipo *perceptron* com três camadas, treinada com algoritmo delta/delta estendido. Os resultados demonstraram a habilidade da RNA em distinguir religamento entre faltas transientes e permanentes, e ainda o tempo exato da extinção do arco.

Uma publicação foi apresentada por Sidhu et al., (1995), em que um projeto, implementação e teste, utilizando uma arquitetura de RNA *feedforward*



multicamadas executa a função de discriminar a direção da falta nas proteções de linhas de transmissão.

Outra utilização de RNAs no SEP é para classificar faltas em relés de proteção de alta velocidade. A proteção de linhas de transmissão tem uma importante tarefa em salvaguardar o SEP. As faltas nas linhas de transmissão necessitam ser detectadas, classificadas e localizadas com precisão e eliminadas tão rápido quanto possível.

Uma importante função dos relés é a seleção de módulo, que é a função que classifica o tipo de falta que ocorreu. O trabalho apresentado por Dalstein & Kulicke (1995), tem esta finalidade. Os autores utilizaram uma RNA tipo p*erceptron* multicamadas.

Já Chowdhury & Wang (1996), também utilizaram uma RNA para classificar faltas. Os autores dentre as diversas arquiteturas associadas aos diversos métodos de aprendizagem, utilizaram dois tipos de RNAs na pesquisa. Uma delas foi a RNA tipo *Kohonen,* com um método de aprendizado sem supervisão, enquanto a outra foi a RNA tipo *perceptron,* com algoritmo supervisionado e do tipo *backpropagation* (retropropagação). A RNA *Kohonen* foi escolhida por produzir uma excelente classificação de padrão, enquanto a *perceptron* foi escolhida por comparação, por ser o esquema mais comumente usado.

Outra publicação envolvendo uma abordagem com RNA no SEP é aquela em que foi usada uma RNA tipo *Time-Delay Network Neural* (TDNN), para classificar as formas de ondas de uma perturbação em um SEP. Este trabalho apresentado por Ghosh & Lubkeman (1995), utiliza a simulação de cinco tipos de perturbações em um sistema elétrico de distribuição, com tensão de 12,47 kV, utilizando o *software Eletromagnetic Transient Program* (EMTP). Foram utilizadas na configuração estudada cargas não lineares, tais como retificadores com tiristores. Foram gerados cinqüenta casos para treinamento e dez casos para teste. Cada amostra é composta de três tensões e três correntes.

Os autores utilizaram no treinamento uma RNA *feedforward* com três camadas, dez neurônios na única camada escondida, com acertos na ordem de 72% e uma RNA com atraso de tempo *(Time-Delay Neural Network),* com acertos na ordem de 93%.

Um outro artigo apresentado por Sonja et al., (1990), descreve uma abordagem utilizando uma RNA para detectar faltas incipientes em alimentadores de

distribuição de energia elétrica. No trabalho, os autores ressaltam que a alta impedância de falta em um alimentador de distribuição não pode ser facilmente detectada pelos modos convencionais de proteção de sobrecorrente. É usada, estrategicamente, uma RNA do tipo *perceptron* multicamadas, com algoritmo de aprendizado retropropagação.

A configuração utilizada foi um sistema típico de distribuição de energia elétrica, com tensão de operação 15 kV, e os padrões de treinamento foram gerados pelo *software Eletromagnetic Transient Program* (EMTP), recolhendo amostras das formas de ondas das três fases das correntes e ajustadas de tal forma que a RNA pudesse distinguir entre operação normal ou anormal do alimentador de distribuição. Foram gerados padrões de treinamento para vários tipos de casos, ou seja:

- Chaveamento anormal da impedância de carga;
- Chaveamento de capacitor e carga normal;
- Chaveamento com alta impedância de falta;
- Chaveamento de capacitor e carga e alta impedância de falta.

Com estas características a RNA foi treinada e avaliada, com o objetivo de detectar uma falta com alta impedância.

Uma pesquisa realizada por Hsu & Huang (1995), mostra uma abordagem de RNA usando método de reconhecimento de padrões para o restabelecimento de um sistema de distribuição. O trabalho consiste em obter um plano de restauração conveniente para a zona não defeituosa após uma falta ter sido identificada e isolada. Este foi desenvolvido sobre o sistema de distribuição da *Taiwan Power Company*, distrito de *Taipei, Taiwan*.

Dentre outros trabalhos sobre localização de falta em sistema de distribuição está a publicação apresentada por Senger (1998), porém, aplicando outra metodologia. O autor utiliza uma rede primária radial (alimentador de distribuição) alimentando transformadores trifásicos ligados em delta-estrela. A localização da falta é realizada por um *software* que está no Centro de Operação de Distribuição (COD), que recebe informações via um canal de comunicação, a partir de um oscilógrafo digital instalado na subestação e que tem partida por sobrecorrente. Este *software* gera pontos de teste a cada cinqüenta metros do alimentador e para cada um desses pontos é calculada a corrente de falta que injetada no ponto produzirá as correntes e as tensões medidas na subestação. Com base neste valor de corrente e para as fases não envolvidas no defeito, pode-se identificar os possíveis pontos de falta.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Yang et al., (1994), afirmam que tomar as providências para que o suprimento de energia não seja interrompido é o primeiro objetivo da qualidade de um sistema de potência. O primeiro passo para o restabelecimento do suprimento de energia após a ocorrência de uma falta é encontrar o mais rápido possível o ponto de falta. Muitas vezes, encontrar este ponto e ainda com exatidão é uma tarefa complexa, principalmente em se tratando de sistemas de distribuição. Ainda, afirmam os autores que em SEPs, são utilizados no Centro de Controle, modelos heurísticos para despachantes experientes na estimação da seção faltosa. Aplicações de modelos baseados em sistemas especialista tem sido objeto de pesquisas amplamente estudadas também.

Apesar destes sistemas oferecerem poderosas soluções na localização da seção em defeito esta abordagem apresenta algumas imperfeições. A manutenção de um sistema especialista viável próprio, demanda pessoas qualificadas. Além disso, é um sistema de diagnóstico difícil para conseguir melhorar seu desempenho, conforme experiências recentemente obtidas. Também, devido a representação do conhecimento convencional de um sistema especialista, a resposta de tempo *on-line* não é satisfeita. Para tanto, segundo os pesquisadores, uma eficiente solução para este problema é a utilização de RNAs.

Bernieri et al., (1994), utilizaram as RNAs para identificar e diagnosticar falta em sistemas dinâmicos. Relatam que as RNAs foram criadas a aproximadamente meio século numa tentativa de reproduzir o aprendizado do cérebro humano. As RNAs tem sido alvo de grande interesse, pela comunidade cientifica, devido sua grande abrangência, baixo custo, compatibilidade com os microcomputadores, etc. Os pontos essenciais de uma RNA segundo os pesquisadores são:

- capacidade para, facilmente, tratar com problemas complexos;
- capacidade para generalizar conhecimentos de situações conhecidas, para situações imprevistas;
- capacidade para executar a classificação de dados;
- baixo tempo de resposta (após a fase de aprendizagem), em razão do alto grau da estrutura em paralelo.

Situações reais de localização de falta em sistema de distribuição são difíceis de serem descobertas. Na tentativa de resolver o problema o mais rápido possível as equipes de manutenção fazem uso das sinalizações dos relés de

sobrecorrente, religadores automáticos, seccionalizadores e dos elos fusíveis que foram queimados, porém, a maioria destas sinalizações são mecânicas e estão nos equipamentos instalados ao longo dos alimentadores ou ramais.

Observa-se que muitas pesquisas atuais envolvendo o SEP, mais especificamente o SDEE, estão utilizando as técnicas das RNAs. É uma ferramenta poderosa à este fim, e está em pleno desenvolvimento, conforme citado nos vários trabalhos aqui referenciados.

Parte deste trabalho que também utiliza RNAs no SEPs, mais especificamente no sistema de distribuição, teve a oportunidade de ser apresentado através da publicação Goes (2000).

1.3 JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

Conforme já mencionado, trabalhar no sentido de que o suprimento de energia elétrica não seja interrompido é o primeiro objetivo da qualidade de um SEP. Entretanto há situações imprevisíveis e difíceis de serem controladas, como as condições atmosféricas, o momento exato da fragilidade total de um equipamento, atuação intempestiva de um dispositivo de proteção e outras mais. No entanto, deve-se ter em mente que o rápido restabelecimento no suprimento de energia, diante de uma anormalidade, deve sempre acontecer.

Há vários trabalhos que tratam do restabelecimento do fornecimento de energia elétrica. As empresas de energia elétrica realizam treinamento em recomposição do sistema, para seus engenheiros, técnicos, operadores e despachantes, periodicamente, como é do conhecimento do autor do trabalho, pois já exerceu a função de engenheiro supervisor da seção de comandos e controle, na subestação de 440 kV, da cidade de Bauru, Estado de São Paulo, Brasil, hoje pertencente à Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP), antiga Companhia Energética de São Paulo (CESP). Pode-se, assim, notar a importância em recompor rapidamente o SEP diante de qualquer anormalidade.

No sistema de transmissão quando ocorre uma falta permanente na linha, a continuidade no fornecimento se faz mediante outras linhas pois as configurações assim permitem (sistema interligado). Entretanto, no sistema de distribuição, devido sua configuração radial, se ocorrer um desligamento pela abertura de um elo fusível, ou pelo bloqueio definitivo de um religador automático ou

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

seccionalizador ou ainda pela abertura do disjuntor da subestação, o suprimento parcial ou total estará deficitário até que se encontre o local da falta, para a partir daí efetuar as manobras necessárias ao restabelecimento. As concessionárias de distribuição de energia elétrica possuem normas orientativas para o restabelecimento do fornecimento de energia.

No SDEE há configurações em que é possível fazer a transferência de carga para outros alimentadores, porém, o local da falta deve ser encontrado. Assim sendo, o primeiro passo para o restabelecimento de energia após a ocorrência de uma falta é estimar o quanto antes o ponto da falta, conforme cita Yang et al., (1994).

Para ilustrar, registra-se um fato ocorrido no alimentador rural no. 13, classe 15 kV, energizado pela subestação abaixadora (138/13.8 kV) da cidade de Ilha Solteira, pertencente a empresa Elektro-Eletricidade e Serviços S.A., regional da cidade de Andradina, Estado de São Paulo, Brasil.

O dispositivo de proteção operava até o bloqueio definitivo todas as vezes que chovia na região. Após encontrar o equipamento bloqueado e consequentemente o trecho defeituoso, percorria-se o mesmo, nada encontrando. Efetuava-se tentativa de religamento e era aceito. Esta situação aconteceu várias vezes e o defeito nunca era encontrado.

Decidiu-se, então, investigar poste a poste os isoladores, cabos , conexões, cruzetas, etc. O trabalho foi programado para um domingo e após percorrido vários postes, os eletricistas notaram uma fissura muito pequena, impossível de ser observada a distância, em um dos isoladores tipo pino. O isolador foi substituído e o defeito não ocorreu mais, mesmo diante da umidade. Após testes, verificou-se que com a penetração da umidade no isolador havia condução de corrente, provocando um curto-circuito fase-terra. O religamento era, então, aceito após um determinado período, pois devido uma pequena estiagem, o nível de isolação melhorava, eliminando a fuga à terra, mantendo a linha energizada.

A implementação via *hardware* está começando a entrar no mercado, devido o advento do relés numéricos. A *General Electric* (GE)-*Power Management* oferece no comércio o relé digital DFP 100, utilizado em alimentadores de distribuição de energia elétrica, que possui entre as suas várias funções, a de localização de faltas.

Este relé necessita como parâmetros de ajustes as características da linha, (impedância de seqüência positiva e o fator ko - razão da impedância de seqüência zero e seqüência positiva).



Também a *Asea Brown Boveri* (ABB), através da sua área de proteção, oferece para proteção de alimentadores, o relé microprocessado DPU 2000R, com a função *'fault location'*.

Este trabalho apresenta uma contribuição no sentido de auxiliar a resolução de problemas de localização de falta em alimentadores de distribuição de energia elétrica, utilizando a metodologia baseada em RNAs.

Esta aplicação em linhas de distribuição de energia elétrica, com o objetivo de localizar faltas é inovadora, permitindo o domínio desta técnica com o uso das RNAs.

Observando a vasta aplicação das RNAs e os seus recursos, procura-se mostrar que uma RNA aplicada em uma configuração de um SDEE, contendo três ramais, possui capacidade de identificar em qual ramal ocorreu a falta, após esta ter sido treinada com um conjunto de padrões de faltas ao longo destes ramais.

A aplicação de RNAs na localização de faltas está bastante voltada para as linhas de transmissão. Para as linhas de distribuição pouco se tem encontrado a respeito deste assunto.

As linhas de distribuição inserem um grau de dificuldade bem maior no tocante a localização de faltas, tanto que este trabalho procurou estudar uma configuração contendo somente três ramais, não perdendo de vista trabalhos futuros, como a ampliação da configuração do SDEE.

Os parâmetros ora utilizados são dados reais de uma subestação e linha de distribuição pertencente a ELEKTRO - Eletricidade e Serviços S.A.

Neste tipo de estudo há que se destacar o exaustivo esforço para simular os curtos-circuitos, bem como pesquisar a melhor arquitetura que atenda o objetivo desejado.

O trabalho é motivante pois usa-se uma poderosa e atraente ferramenta que são as RNAS. Além disso, abrem-se também novas fronteiras de investigações científicas nesta direção.

A descrição mais detalhada da metodologia utilizada está apresentada no Capítulo 4, seção secundária 4.4 .

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi organizada em seis capítulos, conforme descrito a seguir:

O Capítulo 2 trata do SEP, dando ênfase ao SDEE, seus principais componentes, tipos de faltas (curtos-circuitos), dispositivos de proteção para estes curtos-circuitos e localização de falta no SEP.

O Capítulo 3 aborda a fundamentação de RNAs, especificamente a arquitetura tipo *perceptron* multicamadas, e seu respectivo algoritmo de treinamento, o *backpropagation*.

O Capítulo 4 descreve as simulações no sistema de distribuição de energia elétrica, a ferramenta de simulação *(software)*, a metodologia utilizada e respectivo fluxograma. Neste capítulo são apresentadas as formas de ondas obtidas em regime permanente e curto-circuito e a configuração utilizada, com seus dados.

O Capítulo 5 apresenta os resultados das simulações, suas etapas, gráficos e tabelas de resultados da RNA na identificação da falta.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões sobre os resultados das simulações e do trabalho de uma forma global.



CAPÍTULO 2

SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

2.1 IMPORTÂNCIA DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

A engenharia de sistemas de energia elétrica é a parte da engenharia que trata da tecnologia de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O grande sistema de energia elétrica que cobre todas as modernas nações representa o maior e mais caro dos sistemas construídos pelo homem. Para os engenheiros cuja função é projetar e operar tais sistemas, eles oferecem os mais desafiadores problemas que podem se encontrar em qualquer ramo da engenharia (Elgerd, 1977).

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem por objetivo gerar uma quantidade de energia elétrica, com confiabilidade e qualidade, suficiente e nos locais mais apropriados, transmiti-la em grandes quantidades aos centros de carga, para em seguida ser distribuída aos consumidores individuais, seqüência esta com o menor custo e preservando sempre os direitos da natureza.

A Figura 2.1 ilustra o caminho percorrido pela energia elétrica desde a fonte primária até o consumidor.



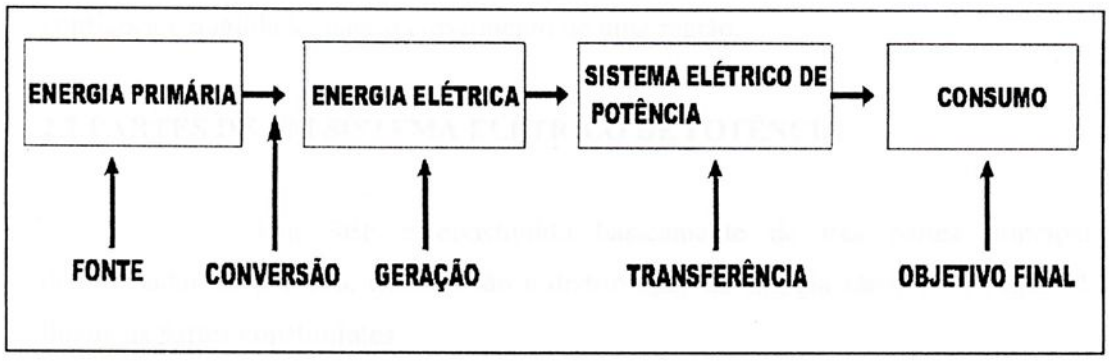


FIGURA 2.1 - Seqüência mostrando a obtenção de energia elétrica.

Como já mencionado a única forma de transportar a energia elétrica é utilizando as linhas de transmissão. O gás é transportado em dutos; o petróleo em oleodutos, ferrovias e navios. O carvão por via férrea e marítima.

O custo do transporte do combustível nuclear é desprezível se comparado com o do transporte da quantidade energicamente equivalente de combustível fóssil. Porém, a localização de reatores nucleares em todos os centros de consumo não é uma solução prática.

A energia hidráulica se torna barata somente se o custo do seu transporte for baixo.

Um sistema de potência bem projetado compreende um grande número de estações geradoras interligadas de modo que a energia total produzida possa ser utilizada em toda a região coberta pelo sistema.

Conforme Stevenson (1978) menciona, o desenvolvimento dos sistemas de corrente alternada teve início nos Estados Unidos em 1885, quando George Westinghouse comprou as patentes americanas referentes ao sistema de transmissão em corrente alternada (CA) desenvolvido por L. Gaulard e J.D. Gibbs, de Paris. William Stanley, antigo sócio de Westinghouse, testava transformadores em seu laboratório; aí, no inverno de 1885-1886, ele instalou o primeiro sistema experimental de distribuição em corrente alternada, que alimentava 150 lâmpadas da cidade.

A primeira linha de transmissão em corrente alternada dos Estados Unidos foi colocada em funcionamento no ano de 1890. Ela transportava a energia elétrica gerada em uma usina hidroelétrica, desde *Willamete Falls* até *Portland, Oregon*, com uma distância de 20 km.

O desenvolvimento de uma determinada cidade ou região, atualmente, está atrelada ao acesso que se tem a energia elétrica. Se isto não ocorrer, dificilmente a

região cresce. É imprescindível a quantidade da energia elétrica disponível, com confiança e qualidade, para o crescimento de uma região.

2.2 PARTES DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Um SEP é constituído basicamente de três partes principais, denominadas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A Figura 2.2 ilustra as partes constituintes.

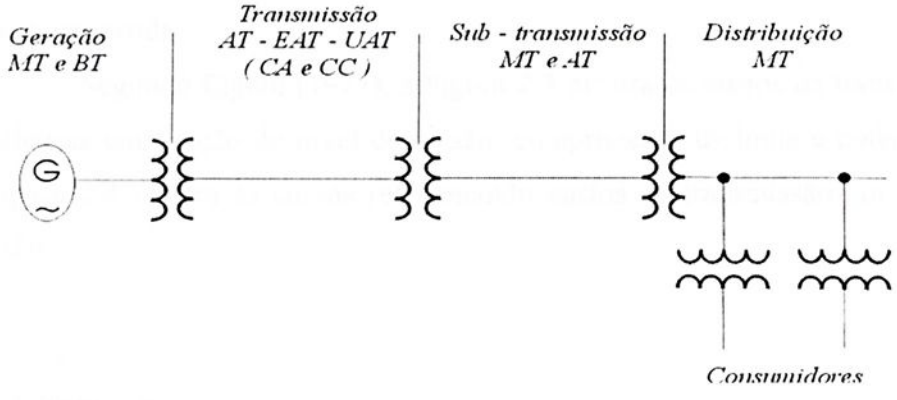


FIGURA 2.2 - Partes constituintes de um sistema elétrico de potência.

2.2.1 Geração

A conversão da energia primária em energia elétrica se faz, a maioria das vezes, através de conversões intermediárias até a geração de energia elétrica. Como exemplo, tem-se:

- Combustível → geração de calor → aquecimento de água → → formação de vapor → turbina → gerador;
- Água → movimento d'água → turbina → gerador;
- Outros

O gerador está limitado por vários fatores dentre os quais destacam-se: isolamento, potência/velocidade e limitações tecnológicas.

Deste modo, no momento da escolha da fonte de energia primária devemos ter em mente que não só a geração da energia elétrica atenderá ao consumo, mas também como poderemos gerar a quantidade necessária de energia elétrica e fazê-la

chegar ao consumidor. Se o consumo está distante da fonte (local da geração) sabe-se que não haverá outra alternativa senão providenciar uma transmissão econômica e racional que é na realidade uma elevação da tensão para transmissão (Negrisoli & Curi).

2.2.2 Transmissão

O transporte de energia elétrica é feito através das linhas de transmissão, cujo valor de tensão é função da quantidade de energia a transportar e da distância e ser percorrida.

Segundo Elgerd (1977), a Figura 2.3 mostra os custos da transmissão da energia elétrica em função do nível de tensão, comprimento da linha e potência da linha e a Figura 2.4 mostra as curvas relacionando custos de transmissão em função nível de tensão.

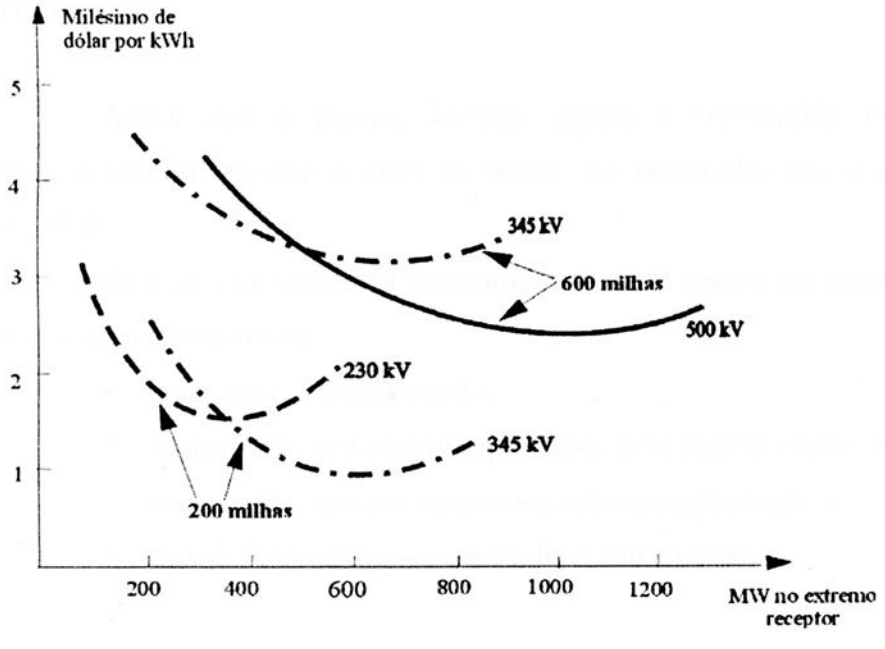


FIGURA 2.3 - Custos de transmissão em função do nível de tensão, comprimento e potência da linha.

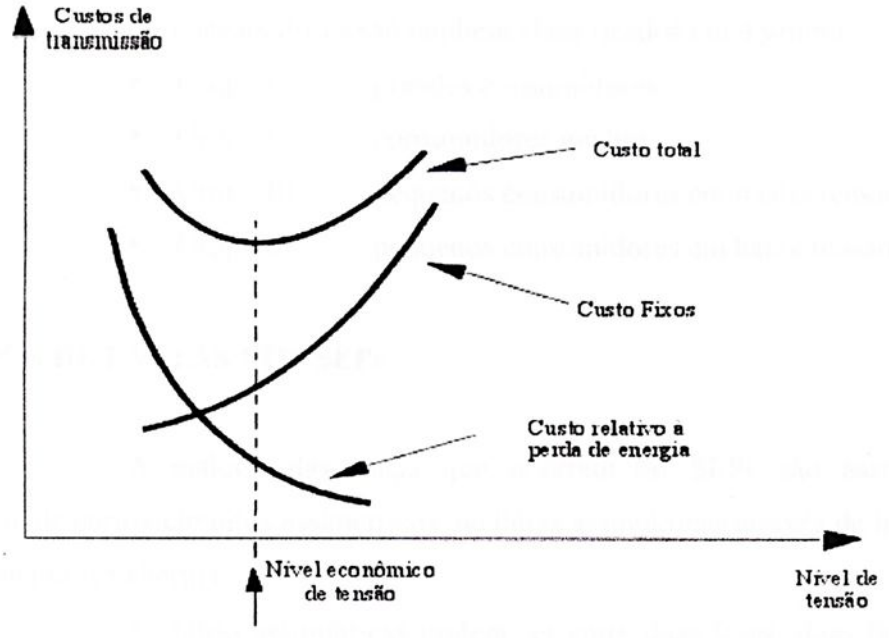


FIGURA 2.4 - Gráfico para determinação do nível econômico de tensão.

2.2.3 Distribuição

Assim que a energia elétrica gerada e transmitida chega aos consumidores, deverá novamente o nível de tensão ser rebaixado, este é o terceiro segmento do SEP.

Os níveis de tensão na constituição do SEP podem ser divididos sem muitos detalhes da seguinte forma:

- geração com média tensão;
- transmissão que sempre opera com uma tensão maior: alta, extra-alta ou ultra-alta em corrente contínua ou alternada, e
- distribuição que opera em média e baixa tensão.

Os níveis de tensão são assim classificados:

- Baixa Tensão (BT) até 1 kV
- Média Tensão (MT) de 1 kV a 66 kV
- Alta Tensão (AT) de 69 kV a 230 kV
- Extra-Alta Tensão (EAT) de 230 kV a 800 kV
- Ultra-Extra Tensão (UET) maior que 800 kV

Os consumidores são também classificados em 4 grupos:

- Grupo I grandes consumidores
- Grupo II consumidores médios
- Grupo III pequenos consumidores em média tensão
- Grupo IV pequenos consumidores em baixa tensão

2.3 TIPOS DE FALTAS NOS SEPs

A maioria das faltas que ocorrem no SEPs são assimétricas e consistem de curtos-circuitos assimétricos, de faltas assimétricas através de impedâncias ou de condutores abertos.

As faltas assimétricas podem ser entre duas fases, duas fases e terra, trifásicas e uma fase e terra. As faltas entre fases ou entre fase e terra pode ou não conter impedância de falta.

A Figura 2.5, a seguir, ilustra os tipos de faltas contendo uma impedância de falta, sendo que a Figura 2.5.a, representa um curto-circuito simétrico.

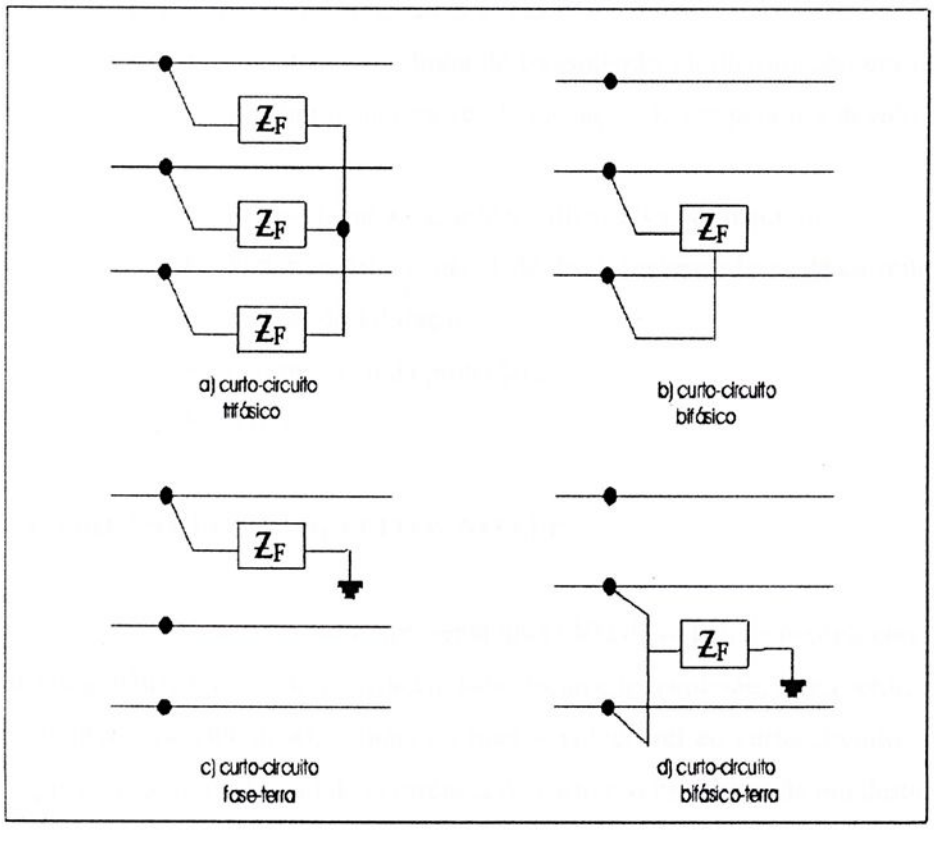


FIGURA 2.5 - Configurações dos tipos de faltas com impedância no SEP.

Kindermann (1992), relata que ao se projetar um sistema elétrico é necessário especificar os equipamentos, não só pela corrente nominal, mas também pela corrente de curto-circuito do sistema, que os mesmos deverão suportar, embora que por rápidos espaços de tempo. Um curto-circuito pode ser entendido como todos os defeitos provocados por um material condutor de impedância desprezível ou não, entre dois pontos do SEP.

As possíveis causas que dão origem a um curto-circuito são:

- Elétrica: fadiga do meio isolante entre partes energizadas;
- Mecânica: quebra de um condutor ou isolante;
- Atmosférica: descargas atmosféricas ou ventos fortes que aproximam condutores;
- Manobras erradas: abertura de uma seccionadora em carga

As principais conseqüências são:

- altas correntes;
- queda e desequilíbrio das tensões.

Conhecer os valores das correntes de curto-circuito é importante e atende a diversos objetivos, relacionados a seguir:

- dimensionar a linha de transmissão ou distribuição em relação ao seu limite suportável de elevação de temperatura devido ao curto-circuito;
- dimensionar a capacidade disruptiva do disjuntor;
- dimensionar a capacidade dos transformadores de corrente, quanto o nível de saturação;
- coordenação da proteção e
- outros.

2.4 OCORRÊNCIAS DE DEFEITOS NO SEP

O mesmo autor apresenta uma idéia da ordem de ocorrências de falhas no sistema elétrico, ou seja, na geração, subestação e transmissão. Cada setor, devido as suas próprias características, é mais ou menos vulnerável ao curto-circuito. A Tabela 2.1. apresenta a porcentagem de ocorrência de curto-circuito em cada um destes setores.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

TABELA 2.1 - Porcentagem de ocorrência de curto-circuito em cada parte do SEP

Setor do sistema elétrico	Curto-circuito
Geração	6%
Subestação	5%
Linhas	89%

2.5 OCORRÊNCIAS DE TIPOS DE CURTOS-CIRCUITOS NO SEP

Dentre os tipos de curtos-circuitos que ocorrem em um SEP, o mais raro é o trifásico, enquanto que o fase-terra é o mais comum. A Tabela 2.2 relata estas porcentagens.

TABELA 2.2 - Porcentagem de ocorrências dos tipos de curtos-circuitos.

Tipos de curtos-circuitos	Ocorrências em %
trifásico	6
bifásico	15
bifásico-terra	16
fase-terra	63

2.6 OCORRÊNCIAS DE CURTOS-CIRCUITOS PERMANENTE E TEMPORÁRIO.

Os curtos-circuitos permanentes são do tipo irreversível espontaneamente, necessitando-se consertar a rede para restabelecer o sistema, enquanto os temporários são aqueles que ocorrem sem haver defeito na rede. Eles podem ocorrer devido vários motivos. Alguns destes motivos são: contaminação do isolador, umidade, salinidade, galhos de árvore, etc. O curto-circuito envolvendo uma fase à terra é o tipo predominante. A Tabela 2.3 mostra as porcentagens dos curtos-circuitos permanente e temporário (Kindermann,1992).

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

TABELA 2.3 - Ocorrências dos curtos-circuitos permanentes e temporários

Curtos-circuitos fase-terra	Ocorrências em %
permanente	4
temporário	96

2.7 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

2.7.1 Introdução

A experiência em localizadores de faltas, também chamado de localizadores de defeitos é maior nas linhas de transmissão que nas linhas de distribuição.

O objetivo destes localizadores é determinar a distância métrica dos defeitos (curtos-circuitos) em relação a barra da subestação, ocorridos nas linhas de transmissão de energia elétrica de alta e extra-alta tensão, bem como nas linhas de distribuição de energia elétrica.

Os defeitos podem ocorrer em qualquer ponto do Sistema Elétrico de Potência (SEP) e com maior freqüência nas linhas de transmissão e distribuição que são consideradas as partes mais difíceis de monitoramento e manutenção devido a sua extensão (Saha & Eriksson, 1985).

Os localizadores de faltas permite a detecção dos pontos fracos no isolamento destas linhas. Os valores que permitem o cálculo da distância do defeito são obtidos no intervalo entre a ocorrência da falta e sua eliminação pela abertura do disjuntor.

Estes dispositivos podem ser utilizados com qualquer tipo de proteção de distância, com ou sem seleção de fase.

A Companhia Energética de São Paulo (CESP), atualmente Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP), utilizou nas décadas de 70 e 80, nas suas linhas de 460 kV, localizadores de defeitos analógicos que operavam juntamente com os relés de distância eletrônicos de estado sólido, tipo PDPS, PDTS e PDE 2000, do fabricante Schlumberger.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Com o advento dos relés microprocessados, a função localização de falta passa fazer parte do relé. Atualmente, tem sido instalado na CTEEP, relés de proteção de linhas de transmissão digitais microprocessados com esta função.

Nos alimentadores do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) tem-se conhecimento da utilização de relés digitais de várias empresas, como a General Electric - Multilin e a Asea Brown Boveri (ABB), que possuem relés de proteção de alimentadores com a função localização de falta.

Cada fabricante apresenta seu produto com suas características, tipos de algoritmos, tamanho, maneira de ensaiar, coleta e transmissão de dados, etc.

2.7.2 Localizadores de faltas

O projeto dos localizadores de faltas baseados em microprocessadores, inclui a escolha do *hardware* e do algoritmo adequado para implementar a técnica selecionada. Várias abordagens foram desenvolvidas e diferentes princípios já foram aplicados ao problema da localização de faltas, de forma mais acentuada nas linhas de transmissão. As técnicas utilizadas podem ser classificadas em duas categorias: dados observados em um único terminal e dados observados nos múltiplos terminais da linha (Domingues, 1998).

Os localizadores de defeitos para as linhas de transmissão servem de base para a abordagem destes em linhas de distribuição. A diferença está na configuração de cada sistema; o sistema de transmissão possui múltiplos terminais (barras), enquanto o sistema de distribuição é radial na sua maior parte. Há que se destacar que o presente trabalho utilizou a metodologia de medir as grandezas elétricas necessárias em todos os terminais da configuração estudada (Figura 4.1). Neste trabalho o localizador está situado na subestação, havendo portanto a necessidade de um sistema de comunicação para transmissão de dados dos terminais distantes à subestação, o que não difere do sistema de transmissão. No caso das linhas de transmissão de dois terminais, os algoritmos utilizam informações provenientes de somente um terminal; se a linha possuir três terminais, utiliza-se informações de todos os terminais.

A transmissão de dados utilizando *software* de alto desempenho é recente nas linhas de distribuição. É possível enviar dados de qualquer ponto de um determinado alimentador à subestação ou Centro de Operação da Distribuição (COD).



Os dados transmitidos podem ser: posição dos contatos de chaves, medições de correntes e tensões, etc. Utiliza-se para isto, tranformadores para instrumentos especiais como é o caso do sensor de corrente e tensão da empresa Lindsey Manufacturing Co, denominado *Smart Pin Current and Voltage Sensors*.

Os sinais são amostrados através de um estação de comunicação local denominada remota, que utiliza *hardware* de tecnologia de ponta e protocolo aberto.

Toda comunicação do sistema é por fibras óticas ligadas em um barramento/anel, de alta confiabilidade, não havendo risco de falhas no sistema por descargas atmosféricas, interferências eletromagnéticas, etc.

A concessionária de energia elétrica ELEKTRO - Eletricidade e Serviços S.A., que atende uma parte do Estado de São Paulo, Brasil, possui um deste sistema de automação em operação num alimentador de distribuição ligado a subestação de 138/13,8 kV, na cidade de Guarujá, Estado de São Paulo, Brasil.

Takagi et al., (1982), apresentaram um algoritmo de localização de falta baseado no método de Newton-Raphson para uma linha de transmissão. As ondas de tensão e corrente medidas, são posteriormente filtradas através da Transformada Discreta de Fourier (TDF), para obtenção dos fasores em regime permanente. Após isto é utilizado a técnica de componentes superpostos e modais de tensão e corrente para o cálculo da falta, permitindo que o sistema seja tratado como três sistemas monofásicos independentes.

Muruoka et al., (1984), desenvolveram um localizador para linhas aéreas de transmissão e a Toshiba Corporation implementou comercialmente. Basicamente, foi utilizado o método de Takagi et al., (1982) com algumas melhorias através de uma compensação na distância de falta, pela constante de propagação. Segundo os autores, testes de campo mostraram bom desempenho do localizador de faltas, principalmente para faltas fase-terra que foram localizadas com grande exatidão.

Eriksson et al., (1985), descreveram uma técnica de localização de faltas usando o Fator de Distribuição de Corrente (FDC), na qual determina-se o ângulo da tensão no ponto de falta e a distância da falta. Esta técnica apresenta mais vantagens que o método aproximado de Takagi et a.l, (1982), uma vez que, o aspecto principal desta técnica é fazer considerações das influências dos efeitos de ambos terminais da linha usando o modelo completo da rede de energia elétrica. Amostras de corrente de carga (pré-falta) são armazenadas e usadas para compensação. Também, são armazenados valores representativos para a impedância da fonte para compensar as

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

variações nos ângulos das impedâncias e, determinar uma correta descrição da rede. As técnicas de localização conforme já mencionado podem ser para linhas de transmissão com dois terminais ou linhas de transmissão para três terminais.

Domingues (1998), apresenta um método para calcular a localização de faltas em linhas de transmissão de alta tensão com três terminais. Foi utilizado para isto os fasores de tensão e corrente trifásicos a 60 Hz, medidos em cada barramento de subestação. Fez-se uso da TDF para filtragem digital. Para simular os vários tipos de faltas foi utilizado o *software Alternative Transient Program* (ATP), bem como várias subrotinas como: sincronização dos dados provenientes dos barramentos, detecção de falta e outras. Segundo o autor os resultados demonstraram um alto grau de precisão, destacando-se a confiabilidade e aplicabilidade do algoritmo proposto.

Moore et al., (1995), relatam que um localizador pode ser implementado de três maneiras possíveis:

1) Como um dispositivo *stand-alone* - o localizador de faltas possui um *hardware* similar ao de um relé digital;

2) Como parte de um relé de proteção digital - neste caso, o algoritmo localizador de faltas é incluído juntamente com o algoritmo do relé de proteção;

3) Como algoritmo independente - aproveita o registrador de perturbação, usando os dados de pós-falta obtidos através do mesmo.

Os localizadores de faltas digitais não necessitam trabalhar com o mesmo tempo de processamento dos relés digitais. Sem esta restrição podem até trabalhar *off-line*. Isto é vantajoso, porque o seu algoritmo pode ser mais "pesado", logicamente, exigindo maior tempo de processamento, contudo, obtém-se melhoras acentuadas na precisão.

Atualmente, os projetos que envolvem os localizadores de defeito são baseados em microprocessadores, que está atrelado ao *hardware* e ao algoritmo adequados.

Como citado na revisão bibliográfica, no capítulo 1, algumas pesquisas já abordaram a localização de faltas em linhas de transmissão e linhas de distribuição.

A Figura 2.6, a seguir, apresenta um diagrama de blocos das partes constituintes a de um localizador de faltas, instalado numa subestação.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

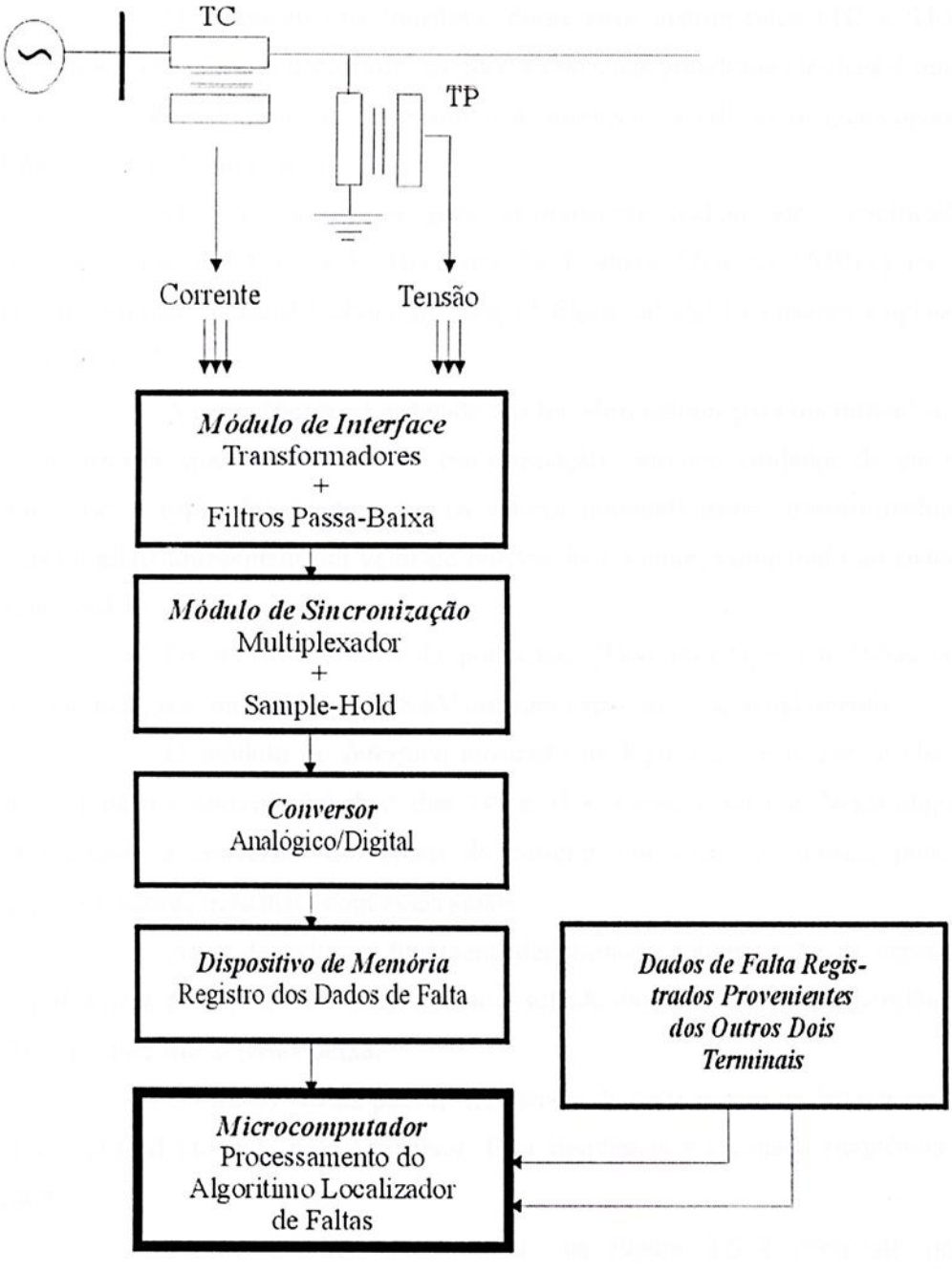


FIGURA 2.6 - Partes constituintes de um localizador de faltas.

O sistema de potência é analógico por natureza, então as grandezas elétricas tensão e corrente da falta devem ser digitalizadas.

A atenuação dos sinais de entrada é feita pelo Transformador de Corrente (TC) e pelo Transformador de Potencial (TP).

O propósito dos transformadores para instrumentos (TC e TP) é reduzir tantas vezes quanto necessário, os altos valores das grandezas elétricas a serem medidas até o valor adequado aos dispositivos de proteção e medição, os quais operam em níveis de isolamento baixos.

Os transformadores para instrumentos podem ser especificados segundo a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ou da American National Standard Institute/Institute of Electrical and Electronics Engineers (ANSI/IEEE).

A carga (*burdem*) instalada nos transformadores para instrumentos, se mal especificada afeta o resultado da transformação, portanto cuidados devem ser tomados com a especificação de todos os valores nominais destes transformadores. Sistemas digitais apresentam um valor de *burdem* bem menor, comparado ao sistema convencional.

Os transformadores de potenciais (TPs) utilizados em linhas com tensão nominal igual ou maior que 138 kV utilizam capacitores de acoplamento.

O módulo de *Interface* mostrado na Figura 2.6 é o que recebe os níveis de tensão e corrente "vindos" dos TPs e TCs, respectivamente. Nesta etapa é ainda realizada a conversão dos sinais de corrente em sinais de tensão, pois os microprocessadores trabalham com esses sinais.

Afim de evitar o fenômeno denominado sobreposição de espectros (efeito *aliasing*), pois é uma fonte de erro no resultado da conversão Analógico/Digital (A/D), utiliza-se filtros passa-baixa.

Os filtros devem possuir freqüência de corte menor ou igual a metade da taxa amostral utilizada pelo conversor. Esta freqüência é chamada freqüência de *Nyquist*.

O próximo módulo mostrado na Figura 2.6 é composto pelos dispositivos *sample and hold* na entrada de cada canal e um multiplexador. O papel do *sample and hold* é manter na sua saída um valor representativo do sinal de entrada no instante de amostragem. A Figura 2.7 exibe um circuito *sample and hold* mais detalhado.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

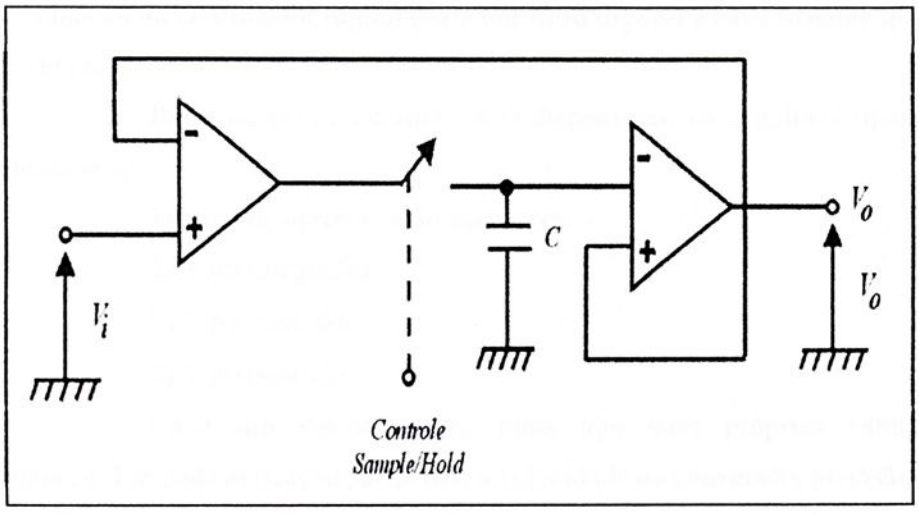


FIGURA 2.7 - Esquema de um circuito *sample and hold*.

Por outro lado, no processo da amostragem há o *clock*, que é quem produz os pulsos em taxa fixa. Para cada instante definido pelo *clock*, ocorre uma conversão dos valores instantâneos dos sinais analógicos de entrada em uma forma digital. A Figura 2.8 apresenta um esquemático da amostragem de sinais:

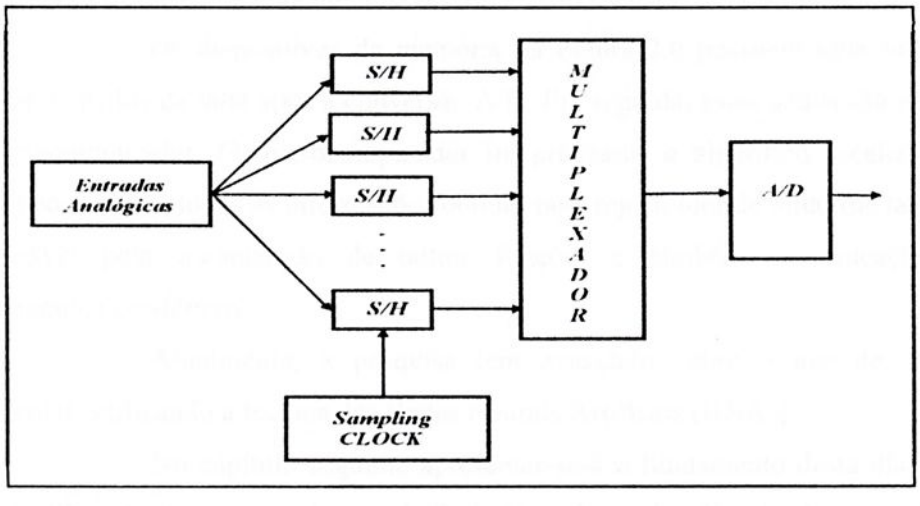


FIGURA 2.8 - Esquema de um processo de amostragem de sinais.

Um outro componente fundamental do localizador digital de faltas é o conversor Analógico/Digital (A/D). Ele transforma sinais contínuos no tempo (analógicos) em sinais discretos no tempo (digitais). No caso os sinais transformados são das grandezas elétricas tensão e corrente. O conversor A/D envia um sinal digital

número binário) ao controlador digital (ou a um filtro digital) a cada instante que chega o pulso do *clock*.

Entre os vários circuitos A/D disponíveis, os seguintes tipos são os mais freqüentes:

1) Tipo de aproximação sucessiva;

2) Tipo integrador;

3) Tipo contador;

4) Tipo paralelo.

Cada um destes quatro tipos têm suas próprias vantagens e desvantagens. Em cada aplicação particular, a velocidade de conversão, precisão e custo podem ser fatores que determinam a escolha do tipo de conversor A/D. Por exemplo, se o fator precisão é o mais importante, o número de *bits* do sinal de saída deve ser grande. O tipo mais simples de conversor A/D é o contador.

A resolução de um conversor é expressa em *bits*. A representação digital é realizada em níveis de quantização, calculada pela fórmula $\mathbf{2}^{\boldsymbol{n}}$, sendo $\boldsymbol{n}$ o número de *bits* do conversor.

Quanto maior o número de *bits* do conversor, menor o erro cometido na conversão e consequentemente uma representação mais perfeita do sinal.

Os dispositivos de memória na Figura 2.6 possuem uma função de registrar os dados da falta após a conversão A/D. Em seguida, estes dados são enviados ao microcomputador. O microcomputador irá processar o algoritmo localizador de faltas, após receber todas as informações obtidas pelo registrador de falta. Ele também é responsável pela manutenção de outras funções e também comunicação com equipamentos periféricos.

Atualmente, a pesquisa tem avançado sobre o uso de sistemas inteligentes, utilizando a técnica das Redes Neurais Artificais (RNAs).

No capítulo seguinte apresentar-se-á o fundamento desta dissertação que é a utilização de uma arquitetura de Rede Neural para localização de um trecho sob falta, numa determinada configuração de um SDEE (Figura 4.1).

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

2.8 OCORRÊNCIAS DE CURTOS-CIRCUITOS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - SDEE

A configuração de um SDEE constitui-se geralmente de uma subestação em derivação (abaixadora), contendo vários alimentadores e cada alimentador contendo vários ramais e sub-ramais.

Os comprimentos dos alimentadores variam muito, podendo nos casos rurais, chegar a dezenas de quilômetros.

O sistema mais simples e mais barato é sem dúvida o sistema radial. Neste sistema, a energia elétrica flui num só sentido, isto é, da fonte para o consumidor. É um sistema cujo alimentador é constituído por três fios (fases). No caso do curto fase-terra o retorno da corrente é pela terra. O valor da corrente de curto-circuito fase-terra é pequeno quando a falta ocorre no final do alimentador, principalmente devido a resistência de contato. Este problema também ocorre quando o cabo alimentador cai em solo que contém areia siliciosa. Isto forma uma camada isolante vitrificada (Kindermann, 1992).

2.9 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO UTILIZADOS NAS LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

Os dispositivos de proteção contra curtos-circuitos mais utilizados nas linhas de distribuição de energia elétrica são: elos fusíveis, religadores automáticos, seccionalizadores automáticos e relés de sobrecorrente.

2.9.1 Elos fusíveis

O elo fusível é a ligação ou união de dois ou mais condutores de uma mesma fase, com a propriedade de fundir-se quando submetido a um excesso de corrente, protegendo assim as instalações elétricas.

Este dispositivo não deverá fundir-se diante da máxima corrente de carga a ele submetido e responder corretamente aos valores da sua curva característica tempo em função da corrente.

Basicamente, os elos fusíveis são constituídos de: contato superior, elemento fusível, tubo de supressão e cordoalha.



Existem quatro tipos de elos fusíveis de distribuição, segundo a relação de rapidez: *K,T,H, e EF*, sendo, respectivamente: rápidos, lentos, auto-surto e força.

Os elos *K* e *T* atuam praticamente no mesmo tempo para pequenas correntes, porém para altas correntes, o elo tipo *K* é mais rápido.

O elo tipo *H* tem a propriedade de evitar a queima desnecessária durante a ocorrência de pequenos surtos de sobrecorrente, como para corrente transitória de magnetização dos transformadores.

Os elos tipo *K* são classificados em preferenciais e não preferenciais, de acordo com a corrente nominal. A coordenação entre elos preferenciais e não preferenciais adjacentes não se estabelece.

2.9.2 Religadores automáticos

O religador automático é um dispositivo de proteção contra sobrecorrente, destinado a abrir e religar uma ou mais vezes um circuito de corrente alternada, de acordo com uma seqüência de operação pré-determinada. Os religadores podem ser classificados:

Quanto a fase

Existem religadores monofásicos e religadores trifásicos e dentre os religadores trifásicos há aqueles que operam de modo monofásico, sendo o bloqueio trifásico. Há também religadores em que a operação e bloqueio são trifásicos.

Quanto ao controle

Existem religadores com controle hidráulico e religadores com controle eletrônico.

Os de controle hidráulico possuem uma bobina ligada em série com a linha, que quando submetida a uma corrente acima do valor de atuação, atraca o núcleo que está solidário aos contatos, tendo como conseqüência a abertura do trecho do alimentador, dependo do ponto de instalação.

A temporização e a seqüência de operação são realizadas por câmaras hidráulicas dotadas de válvulas e pistões que fazem parte do conjunto, enquanto o fechamento é feito por meio de molas carregadas, pelo movimento do núcleo móvel da bobina.

Para religadores automáticos com corrente nominal acima de 200 A utiliza-se bobina de fechamento.

Os religadores controlados eletronicamente apresentam uma vantagem sobre os hidráulicos, pois a faixa de ajuste além de ser mais ampla é também mais precisa.

Estes religadores utilizam um transformador de corrente do tipo bucha, cuja finalidade é alimentar o controle eletrônico onde são ajustados a corrente de atuação, curva característica tempo em função da corrente, número de operações e seqüência de operação. Estes ajustes são possíveis com o religador em operação.

Ainda podemos classificar os religadores automáticos quanto ao tipo interruptor, que pode ser a óleo ou a vácuo. O interruptor a óleo tem como finalidade interromper o arco elétrico e ao mesmo tempo manter a isolação e no casos dos religadores hidráulicos, o óleo tem a finalidade de temporizar e efetuar a contagens até o bloqueio definitivo.

Já o interruptor a vácuo é mais vantajoso, exigindo o mínimo de manutenção.

A) Ajustes de um religador

Os religadores possuem ajustes independentes, ou seja um ajuste é da proteção de fase e o outro da proteção de terra.

Os ajustes de proteção de fase são: corrente mínima de atuação, seqüência de operação, número total de operações para bloqueio e alteração da característica da operação temporizada.

A proteção de terra admite ajustes da corrente mínima de atuação de terra, seqüência de operação e curva característica tempo em função da corrente.



2.9.3 Seccionalizadores

O seccionalizador é um dispositivo de proteção que tem a propriedade de executar contagens de desligamento de um religador. É um dispositivo de proteção de retaguarda. Portanto, o seccionalizador só poderá ser instalado em sistemas que contenha religadores automáticos ou disjuntores com relé de religamento.

A Figura 2.9 ilustra um trecho de uma linha de distribuição contendo um religador automático em série com um seccionalizador.

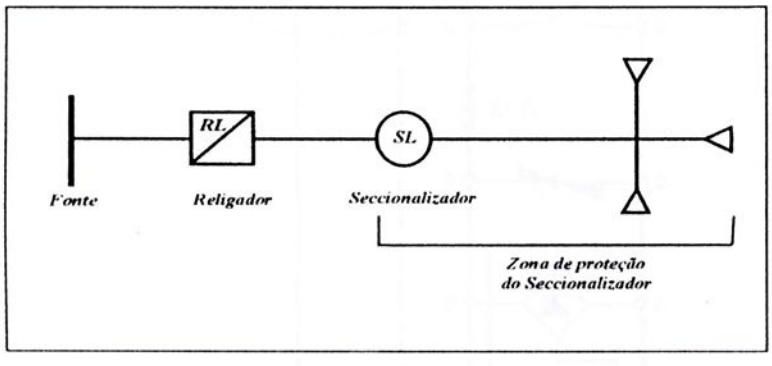


FIGURA 2.9 - Religador (RL) em série com um seccionalizador (SL).

Os seccionalizadores com controle hidráulico mais utilizados são de fabricação inglesa.

Seccionalizadores com controle eletrônico geralmente são de tamanho bem menores aos hidráulicos, pois as bobinas série e o restante do mecanismo de contagem fica substituído pelo circuito eletrônico.

A) Controle de proteção de terra para seccionalizadores hidráulicos.

Os seccionalizadores equipados com dispositivos de proteção de terra são atualmente os mais utilizados e indicados, pois através de dados estatísticos, está provado que a maior parte dos curtos-circuitos em uma linha de distribuição envolvem a terrra.

O dispositivo de proteção de terra dos seccionalizadores hidráulicos, é constituído de um relé de terra situado internamente no recipiente e um mecanismo

capaz de executar a contagens de desligamentos, quando o defeito envolver a terra e bloquear, caso haja necessidade, conforme está mostrado na Figura 2.10.

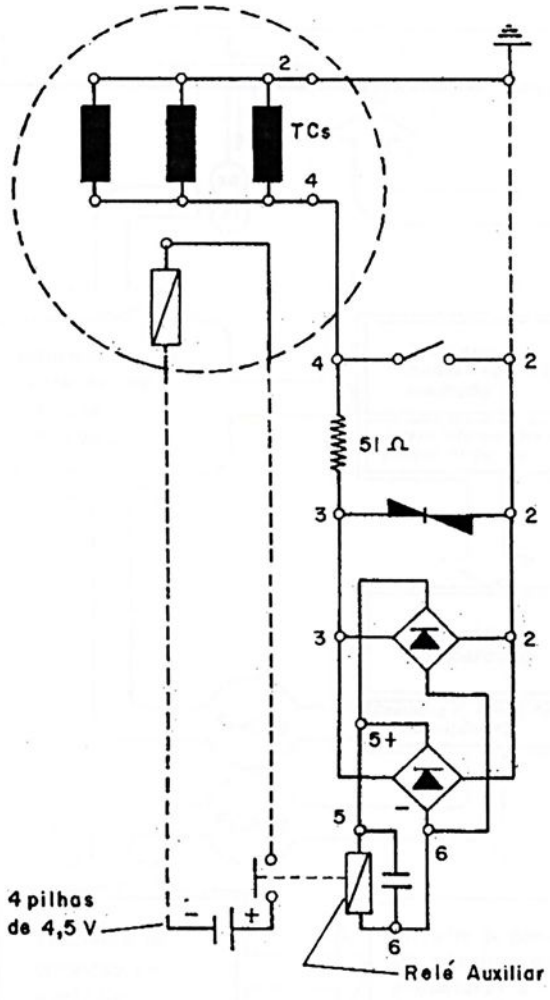


FIGURA 2.10 - Circuito eletrônico de terra (5 A) de um seccionalizador.

2.9.4 Relés de sobrecorrente

Segundo Mason (1956), a função dos relés de proteção é remover o mais rápido possível de operação qualquer elemento do sistema de potência que está sendo submetido a um curto-circuito ou quando do inicio de uma condição anormal que possa causar danos ou qualquer outra interferência que prejudique a operação do resto do sistema. O relé é ajudado pelo disjuntor, que é o equipamento próprio para desligar

um circuito quando recebe um sinal de abertura (*trip*) do relé, conforme pode ser visto na Figura 2.11.

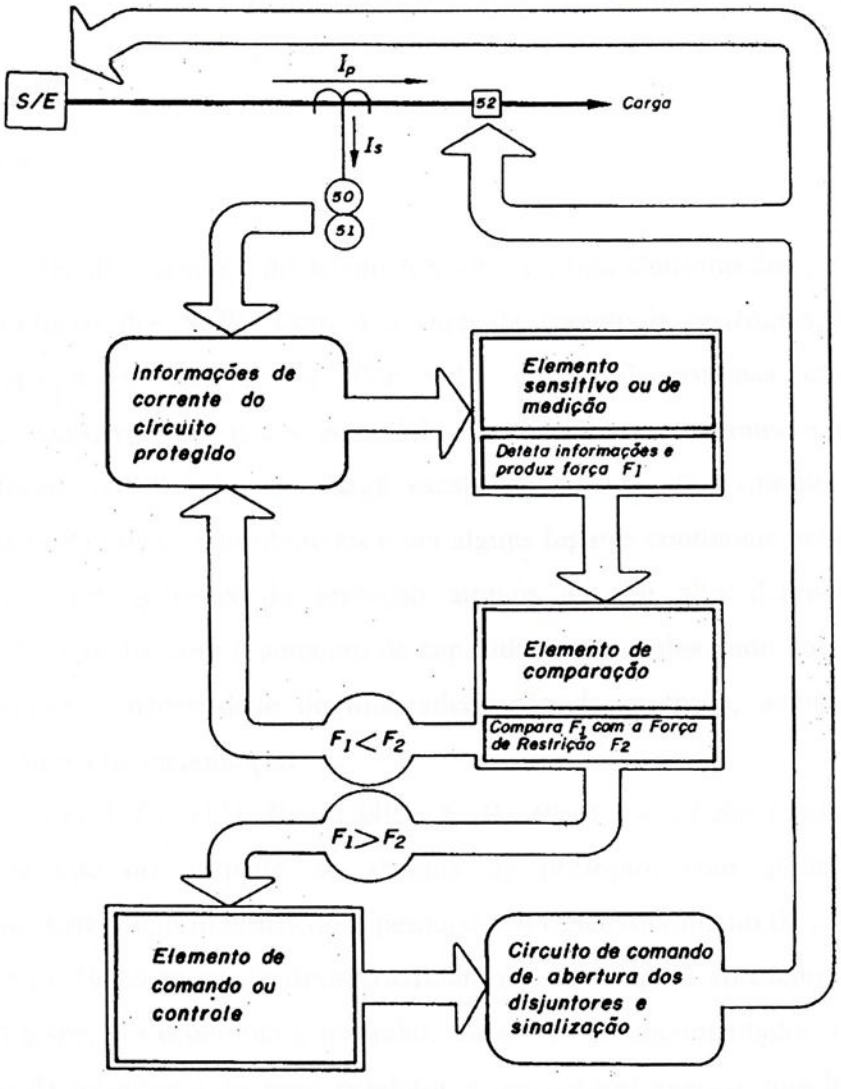


FIGURA 2.11 - Fluxograma do funcionamento de um relé de sobrecorrente secundário com elemento instantâneo (50) e um temporizado (51).

Os relés de sobrecorrente por indução podem ser construídos de maneira que incluam qualquer combinação de dois tipos de relés (tensão e corrente ou só tensão ou só corrente), isto é, um único disco ou unidade copo pode ter diversas bobinas de operação desenvolvendo torques individuais ou aos pares, proporcionais aos quadrados das grandezas atuantes ou ao produto de duas grandezas vezes uma função do ângulo entre elas. A equação universal para tais relés seria a seguinte:

$$T = K_1 I^2 + K_2 V^2 + K_3 VI \cos(\theta - \tau) + K_4 \quad (2.1)$$

Para que essa equação descreva um relé particular, uma ou mais constantes K_1 ou K_2 ou K_3 podem ser igualadas a zero (Caminha, 1977) e (Mason, 1956).

A) Relés digitais

Desde o começo do século XX relés do tipo eletromecânico tem sido usado como proteção dos SEPs. Com o avanço da tecnologia eletrônica, os relés estáticos começaram a substitui-los. Por volta de 1970, sistemas com relés completamente estáticos, com testes automáticos e função monitoramento contínuo incorporados foram introduzidos em larga escala no sistema de extra-alta tensão. Aqueles relés deram grandes contribuições e em alguns lugares continuam atendendo a operação estável dos sistemas de proteção através de seu alto desempenho e confiabilidade. Entretanto, com o aumento da capacidade e complexidade dos sistemas de potência, houve a necessidade de uma adequação da proteção, aumentando a qualidade e economia na manutenção.

Em 1969, G.D. Rockefeller *da Westinghouse of the United States* publica estudos que diz respeito ao sistema de proteção, com ajuda de um minicomputador. Este início intensificou a pesquisa e o desenvolvimento do relé digital em todo o mundo. No começo do desenvolvimento, o relé digital apresentou poucas vantagens com respeito a economia e tamanho, usando um minicomputador. Contudo, com o advento da tecnologia do semi condutor e seu notável avanço, que levou ao desenvolvimento do microcomputador e microprocessador, que passaram a ser peças importantes no avanço da proteção digital (Toshiba, 1996). Segundo registro constante do mesmo documento, a empresa *Toshiba Corporation*, no ano de 1980, após anos de testes de campo colocou um relé diferencial digital em serviço.

Apesar de pouco tempo de utilização nos sistemas de potência o estudo e apresentação dos relés digitais é muito abrangente.

Phadke & Thorp (1988), relata sobre os *softwares* utilizados nos programas de computadores para aplicação de relés que são escritos a maior parte em linguagem *Assembly*. A razão para isto é a necessidade de tempo disponível após a ocorrência da falta, tão eficiente quanto possível. As linguagens de alto nível – tal como *Fortran, Pascal, C,* etc., – freqüentemente tendem a ser ineficientes para aplicação de



relés. É possível que dentro de algum tempo, com os tempos das instruções dos computadores tornando-se mais rápido, as linguagens de alto nível possam substituir a linguagem *Assembly*. Entretanto, até que isto aconteça, a linguagem *Assembly* será usada no cálculo. O problema com esta linguagem é que ela não é transportável entre computadores de tipos diferentes.

Elmore (1994), afirma que sob o ponto de vista do sistema, relés microprocessados ou numéricos não são diferentes dos relés eletromecânicos, estado sólido ou digital. As correntes e tensões devem ser medidas e comparadas com aquelas ajustadas. Outras entradas como canal de comunicação via *Carrier*, posição do disjuntor, etc., devem existir.

Entretanto, o relé numérico deve trabalhar dentro de uma estrutura de dados amostrados momento a momento. Correntes, por exemplo, não são tratadas numa base contínua, mas elas, como todas as entradas são amostrados uma de cada vez.

Os microprocessadores tem de proporcionar na ação, através de relés, a notável capacidade de amostrar tensões e correntes em alta velocidade, manipulando os dados, para calcular a distância ou medir a sobrecorrente, mantendo a informação da falta e função de autoverificação (*self-checking*).

A Figura 2.12 mostra um sistema com um filtro passa-baixa (*Low-Pass Filter* (LPF)) para cada canal e seu respectivo amostrador/retentor (*sample/hold* S/H), um multiplexador (MUX), um conversor analógico digital (A/D) e um microprocessador (μP), enquanto a Figura 2.13 apresenta um *hardware* básico de um relé microprocessado.

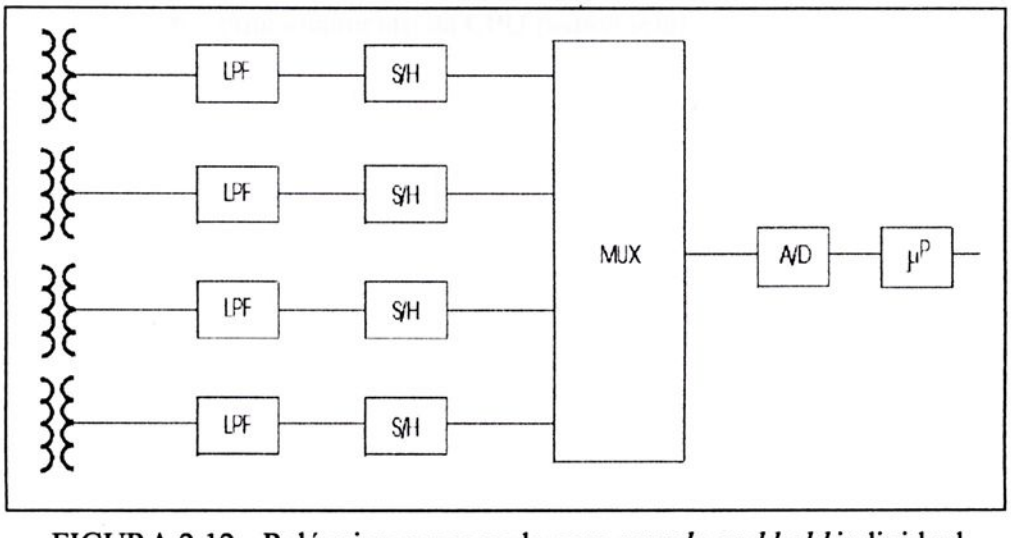


FIGURA 2.12 - Relé microprocessado com *sample and hold* individual.

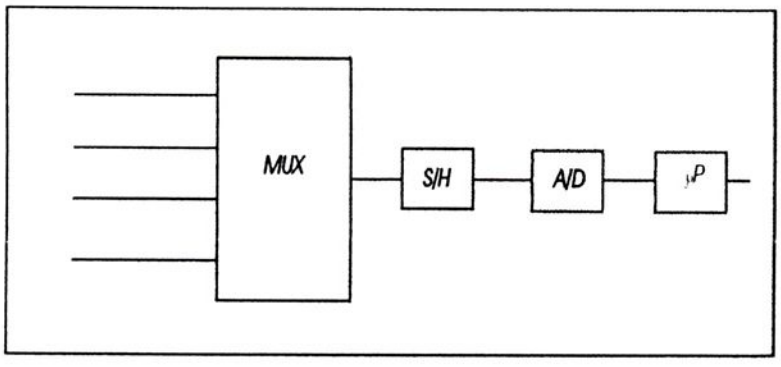


FIGURA 2.13 - *Hardware* básico para relé microprocessado.

Ao contrário dos relés convencionais o relé digital está sempre ativo, o que permite a ele ficar testando continuamente suas partes vitais, tanto de *hardware* como de *software*. Qualquer defeito pode ser logo identificado e disparado o alarme conveniente.

O auto teste de um relé digital pode monitorar:

- Sistema de aquisição de dados
- Tempo de conversão A/D
- Previsão de conversão A/D
- Validade das leituras
- Fontes de alimentação
- Integridade do *software* armazenado na EPROM
- Integridade dos ajustes
- Funcionamento da CPU *(watch dog)*

CAPÍTULO 3

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

3.1 INTRODUÇÃO

Humanos são mais inteligentes que computadores? Por que dizemos isto? Estará isto relacionado com o fato de sermos seres humanos e pensarmos que sem um pouco de metal e silício não se pode fazer tudo que nós podemos? Ou será que os computadores são diferentes de nós pela maneira que trabalham? Por exemplo calcular a multiplicação de um número com oito ou nove dígitos é um cálculo trivial para um computador, porém é um trabalho árduo para um ser humano normal (Giovanini, 1998).

Muitas perguntas e comparações iguais a esta poderiam ser realizadas, mas o objetivo não é este. O computador é uma máquina serial de alta velocidade, enquanto o cérebro humano é uma lenta máquina paralela. Por aquele ser uma máquina seqüencial desempenha muito bem operações seriais como a multiplicação de números enquanto o cérebro por ser uma máquina altamente paralela desempenha satisfatoriamente operações paralelas como a visão, pois ao contrário do cálculo com números, onde uma operação depende apenas de uma operação anterior, a visão depende de muitos fatores distintos que ocorrem simultaneamente (Giovanini,1998).

unesp

O propósito da computação neural é a obtenção dos princípios gerais em que se baseiam as soluções do cérebro humano para estes problemas e aplicá-los aos sistemas computacionais.

Os pesquisadores de RNAs acreditam que o cérebro humano, constituído de neurônios, constrói suas próprias estratégias de processamento de informações, através do que é usualmente chamado de "experiência". Assim, o foco deste novo desafio é baseado no reconhecimento por essa comunidade de que este processa informações de uma forma diferente do computador convencional em que as informações são processadas seqüencialmente por estruturas simbólicas.

As RNAs tem sido utilizadas em várias aplicações, tais como: Reconhecimento de Padrões (Widrow, 1998), Processamento de Sinais (Haykin, 1992), Processamento de Fala (Waibel, 1989), Robótica (Van Der Smagt, 1991), Identificação e Controle (Narendra, 1990), Otimização de Sistemas (Tagliarini, 1991) e também no Sistema Elétrico de Potência (SEP), conforme bibliografia mencionada no capítulo 1.

As características que tornam a metodologia das RNAs interessante do ponto de vista da solução de problemas são:

- Capacidade de "aprender" através da experiência; diz-se que tal "aprendizado" ocorre quando a rede consegue mapear soluções generalizadas para uma classe de problema;
- Desempenho eficiente em processos onde há ausência de conhecimento explícito sobre como identificar uma solução factível;
- Não necessidade de identificação de eventuais modelos matemáticos que descrevem o comportamento do sistema analisado;
- Elevada imunidade ao ruído, isto é, o desempenho da rede não entra em colapso em presença de eventuais informações incorretas ou ausentes.

3.2 NEURÔNIO BIOLÓGICO

Segundo Kovács (1996), a origem da teoria das redes neurais remonta aos modelos matemáticos e aos modelos de engenharia, de neurônios biológicos. A célula nervosa ou neurônio foi identificado anatomicamente e descrito com notável

detalhe, pelo neurologista espanhol Ramóny Cajal no século XIX. Como qualquer célula biológica, o neurônio é delimitado por uma fina membrana celular, obtida da sua função biológica normal e possui determinadas propriedades que são essenciais para o funcionamento elétrico da célula nervosa.

O neurônio então possui um corpo celular ou soma, dentro do qual encontram-se a maioria dos seus orgânulos. Do somador de cada neurônio partem prolongamentos que podem ser funcionalmente divididos em conexões denominadas dendritos e axônios, conforme ilustrado na Figura 3.1.

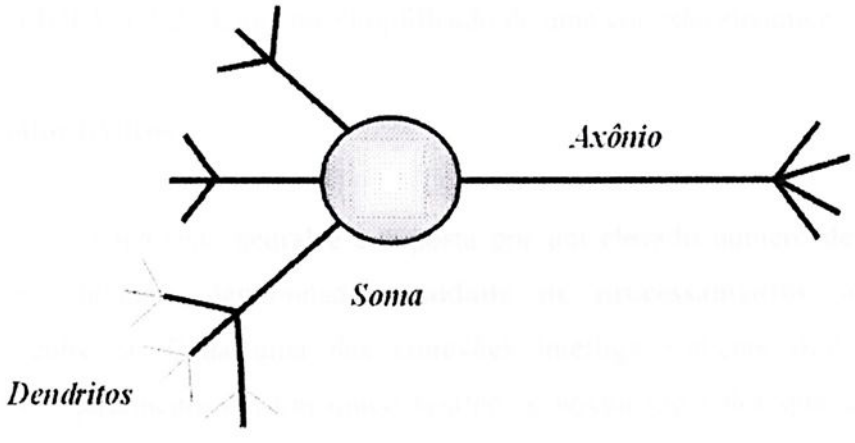


FIGURA 3.1 - Esquema simplificado de um neurônio.

O neurônio é uma célula altamente especializada, capaz de receber impulsos elétricos a partir de seus dendritos, processá-los no somador e finalmente, transmiti-los através de seu axônio (geralmente único) para os dendritos (ou mesmo para o somador) de outros neurônios.

A conexão entre um axônio de um neurônio e um dentrito (ou somador) de outro é denominado sinapse (Figura 3.2). A sinapse é a unidade funcional básica para a construção de circuitos neurais biológicos e envolve a posição das membranas plasmáticas de dois neurônios de modo que forma uma junção pontual (o tamanho de uma junção sináptica é menor do que um μm) e orientada do neurônio pré-sináptico para o pós-sináptico.

O cérebro humano possui cerca de 100 bilhões de neurônios, cada qual com aproximadamente 10 mil interconexões. Deste modo, o número de conexões possíveis é maior do que o número de partículas atômicas que compõem o universo. Na realidade estima-se em dezenas de trilhões o número de conexões existentes no cérebro.

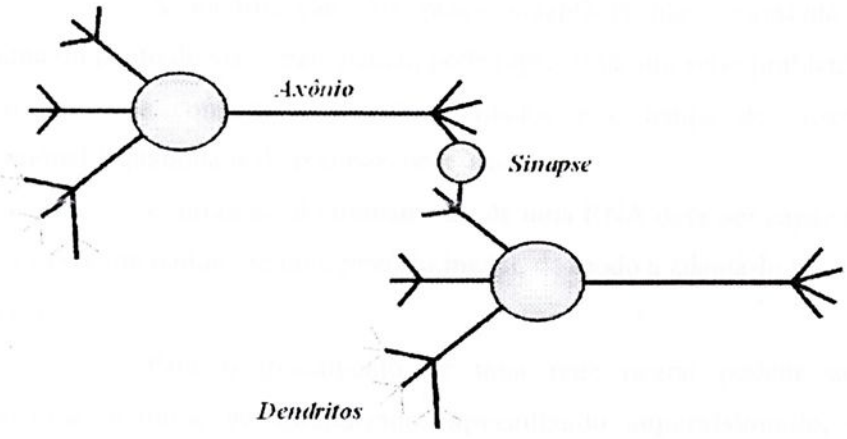


FIGURA 3.2 - Esquema simplificado de uma conexão sináptica.

3.2.1 Conceitos básicos

Uma rede neural é composta por um elevado número de elementos processadores, também denominados **unidade de processamentos**, amplamente conectados entre si. Cada uma das **conexões** interliga somente dois elementos processadores, geralmente em um único sentido, e possui um valor que determina o grau de conectividade entre estes, denominados **pesos** da conexão.

Deste modo, todo processamento é realizado distributivamente entre os elementos processadores da rede, enviando seu resultado para outras unidades através das conexões entre eles. Por isso as RNAs são conhecidas como sistema de **processamento distribuído e paralelo (PDP).** A forma pela qual os elementos processadores estão interligados é denominada **topologia** ou **padrão de interconexão.**

Uma RNA também pode ser denominada rígida ou plástica. Ela é rígida quando sua topologia não pode variar; caso contrário é denominada flexível ou plástica, pois poderá crescer e diminuir de acordo com a necessidade do sistema. As redes rígidas são mais simples e, consequentemente, as mais utilizadas.

Um dos maiores problemas em sua utilização é determinar o número de elementos processadores a serem utilizados e a topologia das conexões entre eles. O método mais utilizado ainda é o de "tentativa e erro". Existem poucas redes plásticas conhecidas.

A dinâmica ou plasticidade da rede neural pode ser feita de dois modos separados: criação (ou remoção) de novos elementos e/ou conexões, modificação nos elementos e/ou conexões existentes (Rumelhart, 1986).

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

A modificação dos pesos sinápticos não representa um grande problema do ponto de vista matemático, pode representar um sério problema na prática, pois os recursos computacionais são limitados e o tempo de processamento é proporcional à quantidade de recursos necessários.

O processo de treinamento de uma RNA deve ser capaz de modificar gradualmente um padrão de interconexão inicial, de modo a adaptá-lo à resolução deste problema.

Para o treinamento de uma rede neural podem ser utilizados mecanismos distintos de aprendizado: **aprendizado supervisionado,** quando são fornecidos integralmente os resultados desejados e o **aprendizado não supervisionado,** quando a própria RNA é capaz de ajustar o seu funcionamento.

A maioria das redes utiliza o aprendizado supervisionado que pode ser considerado como a capacidade que a rede possui de modificar o seu desempenho a partir da comparação entre a resposta obtida e a resposta desejada (Figura 3.3).

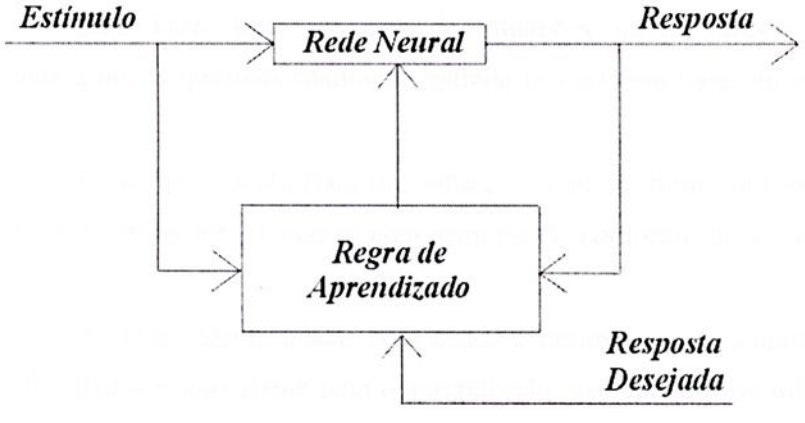


FIGURA 3.3 - Representação esquemática do aprendizado supervisionado.

As redes não supervisionadas, por sua vez, têm a capacidade de determinar uma correlação entre possíveis padrões de entrada e são particularmente úteis nos problemas em que as entradas variam com o tempo de forma conhecida (Figura 3.4).

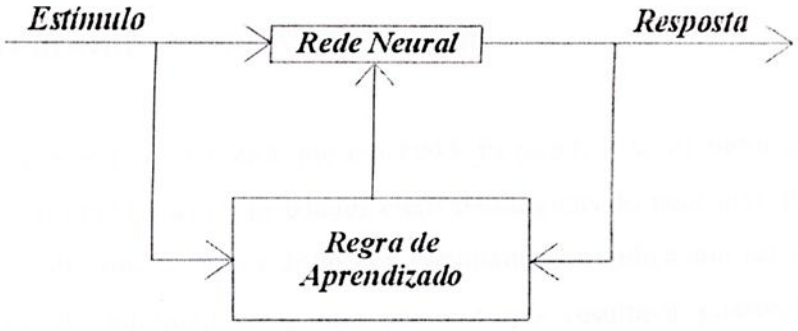


FIGURA 3.4 - Representação esquemática do aprendizado não supervisionado.

3.2.2 Utilização do Conhecimento

Os neurônios que passaram por um aprendizado são expostos aos novos estímulos de entrada que são diferentes dos utilizados para o treinamento. Resultam então dados de saída correspondentes aos novos estímulos. Em última análise, os dados de saída são conseqüência do aprendizado anterior. Trata-se da utilização do tecido nervoso para fazer uma previsão de situações novas (dados de saída) correspondentes a novas questões (dados de entrada novos) com base em experiência adquirida.

O acima exposto trata das situações que ocorrem com as ações do cérebro humano. Com as RNAs ocorre algo semelhante conforme menciona Spandri (2000).

As redes são treinadas com dados experimentais para aprendizagem. A qualidade dos dados é importante para o aprendizado, exercendo forte influência no desempenho das redes. O aprendizado é uma etapa prévia e consiste em ajustes de pesos e bias de redes cujas funções de transferência e estrutura de neurônios tenham sido pré-definidos.

Uma vez a rede treinada, a mesma é utilizada para reprodução de dados de saída correspondentes a novos dados de entrada. Esta etapa é a do uso efetivo da correlação matemática para estimar novos dados de saída correspondentes a novas entradas. Cabe destacar aqui que o treinamento da RNA é feito uma única vez, após definido qual será a arquitetura. Um novo treinamento será exigido somente se ocorrer alguma mudança por exemplo no domínio dos dados.

unesp

3.3 NEURÔNIO BOOLEANO DE McCULLOCH

Kovács (1996), cita que em 1943, inspirados talvez pelos avanços na determinação experimental das propriedades eletrofisiológicas do neurônio, pelos então recentes resultados de Alan Turing e John von Neumann que indicavam ser booleana a natureza essencial da inteligência, o que por sua vez resultava possivelmente da atividade neuronal, Warren McCulloch, lembrado nos anais da ciência como um médico, filósofo, matemático e poeta, juntamente com o estatístico Walter Pitts publicaram no *Bulletin of Mathematical Biophysics* um artigo com o título: *"A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity"* que hoje é a referência número um para a teoria das RNAs. Descontadas todas as imprecisões foi sem dúvida o primeiro artigo em redes neurais.

O neurônio de McCulloch era um dispositivo binário: a sua saída poderia ser **pulso** ou não **pulso** e as suas várias entradas tinham ganho arbitrário e poderiam ser excitatórios ou inibitório, explica Kovács (1996).

Todas as RNAs são compostas por elementos matemáticos denominados neurônio, que pode ser entendido conforme mostra Figura 3.5.

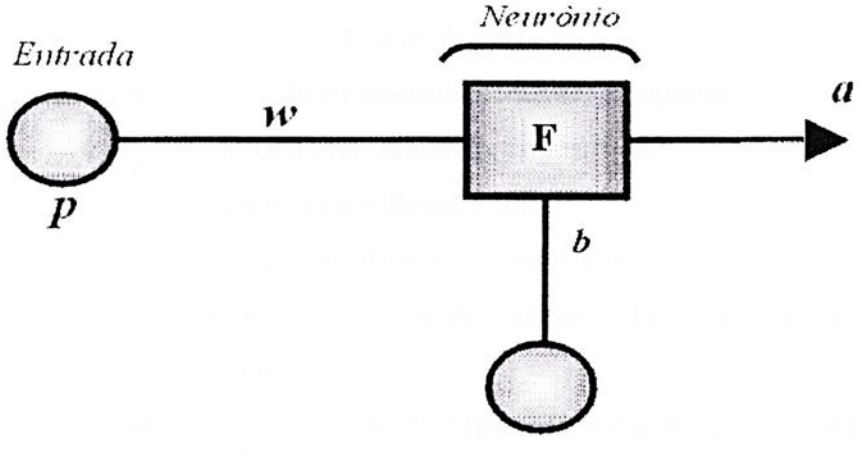


FIGURA 3.5 - Esquema de um neurônio.

Um neurônio recebe como entradas um sinal (número) ***p*** multiplicado por um peso ***w*** e um termo linear o bias ***b***. Essas entradas são somadas e tratadas por uma função ***F*** do neurônio, produzindo a saída do mesmo sinal, ou seja, o número ***a*** .

Em termos matemáticos:

$$a = F(w \cdot p + b) \tag{3.1}$$

O peso ***w*** e o bias ***b*** são os parâmetros ajustáveis (livres, variáveis) do neurônio e da rede neural.

Utilizando agora um modelo geral do neurônio artificial, conforme ilustrado na Figura 3.6, obtem-se:

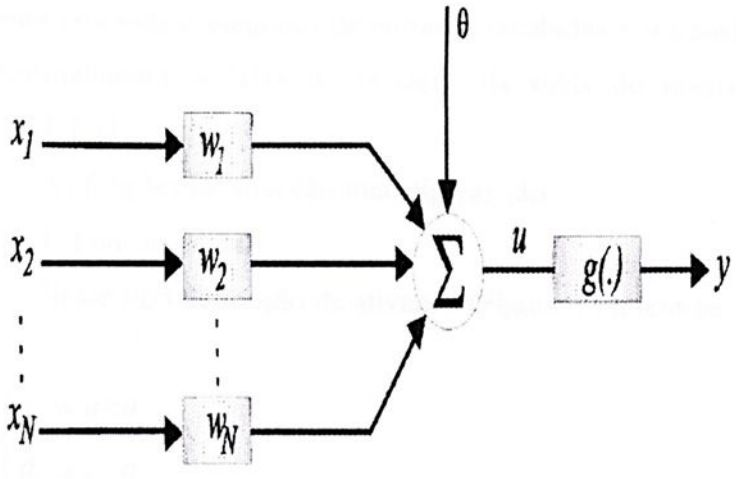


FIGURA 3.6 - Modelo do neurônio artificial.

$x_1, x_2 \ldots x_N$ são os sinais de entrada.

$w_1, w_2 \ldots w_N$ são os pesos ou conexões sinápticas.

θ é a polarização associada ao neurônio.

u é a saída do combinador linear.

$g(.)$ é a função de ativação do neurônio.

y é o sinal de saída do neurônio ou estado de ativação do neurônio

Nesse modelo, os sinais de entrada x_i são ponderados (multiplicados) pelos respectivos pesos w_i (sinápses); e se o valor de w_i for positivo a sinápse será excitatória, caso contrário a sinapse será inibitória. Em seguida, o valor de polarização θ e os sinais de entrada x_i, ponderadas pelas respectivas sinápses w_i do neurônio, são somados e o valor de u é aplicado à função de ativação $g(.)$ (Figura 3.7), com o objetivo de limitar o valor do sinal de saída y do neurônio.

Em termos matemáticos, têm-se:

$$u = \sum_{i=1}^{N} w_i . x_i + \theta \tag{3.2}$$

$$y = g(u) \tag{3.3}$$

A partir da eq. (3.2) e eq. (3.3), verifica-se que a função de ativação *g(.)* simplesmente processa o conjunto de entradas recebidas e o transforma em estado de ativação. Normalmente, a faixa de variação da saída do neurônio pertence ao intervalo [0,1] ou [-1,1].

As funções de ativação mais típicas são:

1) Função degrau:

Nesse tipo de função de ativação (Figura 3.7), tem-se:

$$g(u) = \begin{cases} 1, \text{ se } u \geq 0 \\ 0, \text{ se } u < 0 \end{cases} \tag{3.4}$$

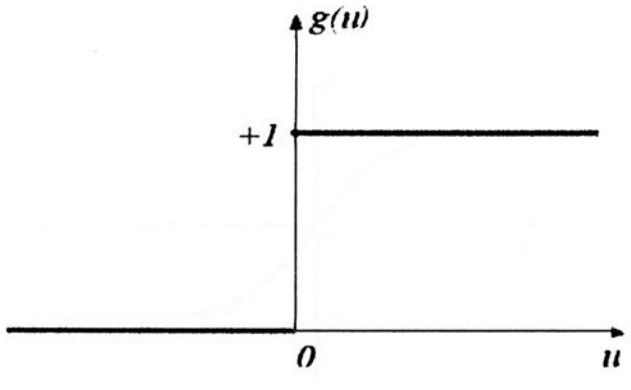


FIGURA 3.7 - Função de ativação tipo degrau.

Então, a saída do neurônio assumirá o valor 1 se o nível de atividade interna total do neurônio for não-negativo, caso contrário a saída do neurônio assumirá o valor de 0.

2) Função sigmóide

Para a função sigmóide (Figura 3.8), tem-se:

$$g(u) = \frac{1}{1+e^{-\beta u}} \tag{3.5}$$

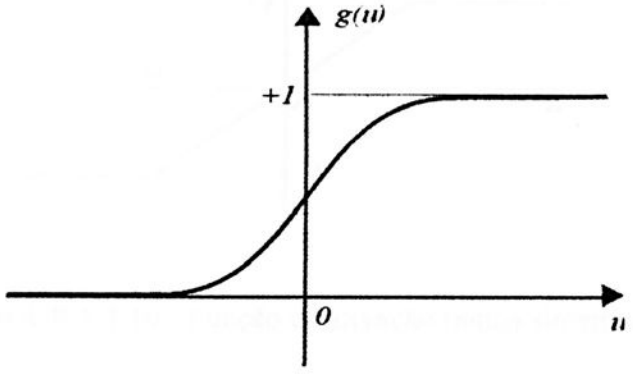


FIGURA 3.8 - Função de ativação tipo sigmóide.

onde β é o parâmetro que define a inclinação (ganho) da função sigmóide. Nesse tipo de função, a saída do neurônio assumirá reais entre 0 e 1.

3) Função tangente hiperbólica

Na função de ativação do tipo tangente hiperbólica (Figura 3.9), tem-se: $g(u) = \frac{1-e^{-\beta u}}{1+e^{-\beta u}}$ (3.6)

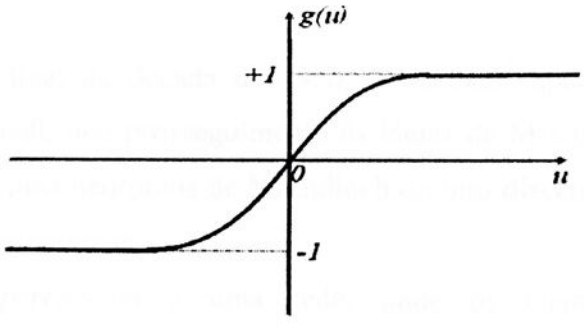


FIGURA 3.9 - Função de ativação tipo tangente hiperbólica.

4) Função rampa simétrica

Na função de ativação rampa simétrica, tem-se:

$$g(u) = u, -1 < \theta < 1 \tag{3.7}$$

$$g(u) = \begin{cases} 1, \text{ se } u \geq \theta \\ -1, \text{se } u \leq \theta \end{cases} \tag{3.8}$$

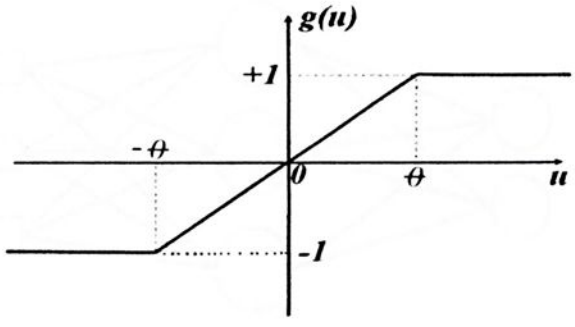


FIGURA 3.10 - Função de ativação rampa simétrica

Para as funções de ativação das Figuras 3.9 e 3.10, a saída do neurônio pode assumir valores reais negativos e positivos no intervalo de [-1,1].

A especificação do tipo de função de ativação a ser adotada na RNA está intrinsecamente relacionada com o tipo da aplicação.

Nas aplicações de RNAs em SEPs são bastante utilizadas os tipos de funções de ativação sigmóide e tangente hiperbólica. Estas funções são simétricas e possuem todas derivadas contínuas (Kovács, 1996). A função rampa simétrica é comum ser utilizada na saída, como o foi neste trabalho.

3.4 ARQUITETURAS DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

No final da década de 1950, Rosenblatt[1] apud Kovács (1996), na Universidade de Cornell, deu prosseguimento às idéias de McCulloch. Ele criou uma genuína rede de múltiplos neurônios de McCulloch do tipo **discriminadores lineares** e chamou esta rede de *perceptron.*

A *perceptron* é uma rede, onde os elementos processadores (neurônios) estão organizados em duas camadas (uma para entrada e outra para saída) totalmente conectadas entre si, conforme apresentado na Figura 3.11. Estas conexões são direcionadas da camada de entrada para a de saída. O grupo de Rosenblatt enfoca o problema de como achar os pesos apropriados das conexões entre cada elemento processador (eficiência sináptica estabelecida entre o neurônio pré-sináptico e pós-sináptico). Ele conseguiu criar um algoritmo que alterava estes pesos de modo a realizar a computação desejada, que foi denominado **algoritmo de aprendizado.**

[1] Rosenblatt, F. *Principles of neurodynamics*. New York, Spartan. (1962).

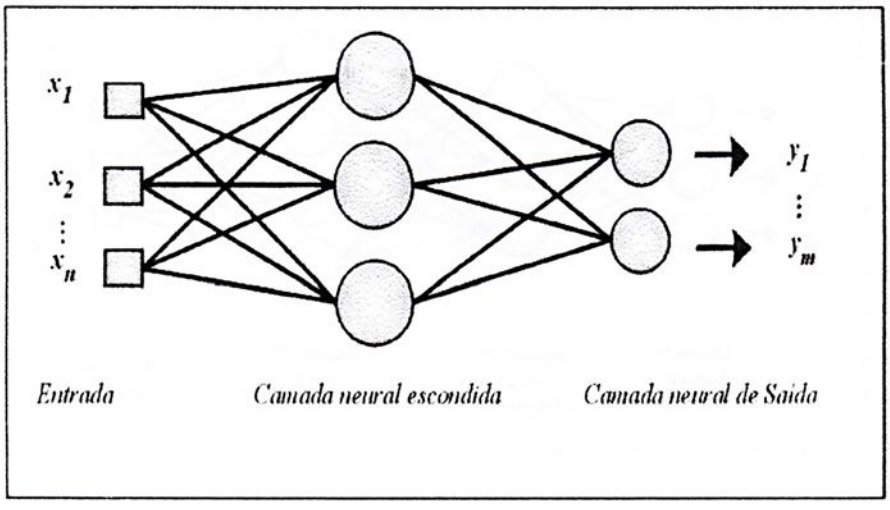


FIGURA 3.11 - Arquitetura *perceptron* com uma camada escondida.

3.4.1 Redes em camadas *feedforward*

As redes em camadas são aquelas em que os neurônios são organizados em camadas. A característica principal das redes em camadas é a presença de uma ou mais camadas escondidas que são responsáveis pela extração e armazenamento de conhecimentos associados a alguma aplicação específica.

Nesse tipo de rede, o fluxo de dados (informações) das entradas para as saídas segue estritamente em uma única direção, isto é, existem apenas ligações entre as saídas dos nós de um nível inferior para as entradas dos nós de um nível superior, não existindo conexões entre os elementos de um mesmo nível. Redes em camadas são utilizadas em várias aplicações, tais como: aproximação de funções, reconhecimento de padrões, simulação de funções lógicas, otimização de sistemas, controle de processos, entre outras (Haykin,1994).

A ilustração de uma rede *feedforward* com duas camadas escondidas é apresentada na Figura 3.12.

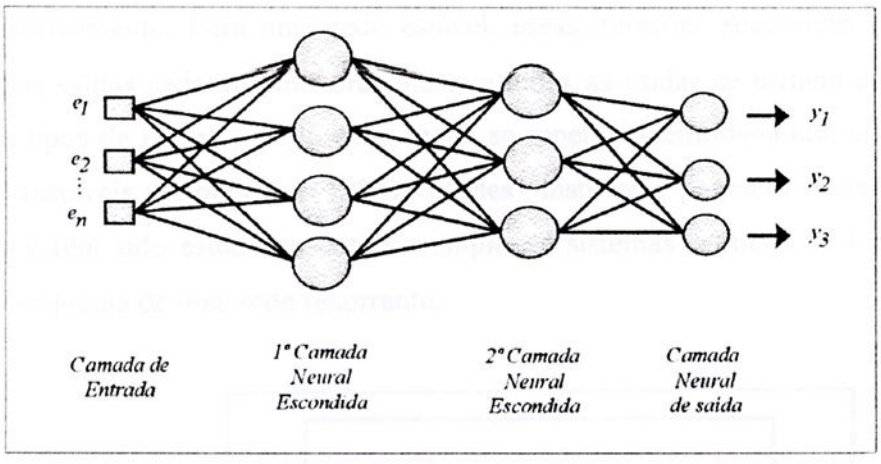


FIGURA 3.12 - Arquitetura *feedforward* com duas camadas escondidas.

A partir da Figura 3.12, observa-se que os nós da camada da rede fornecem as informações (vetores de entrada) as quais constituem os sinais de entrada que serão aplicados aos neurônios da segunda camada (1ª camada neural escondida). Os sinais de saída da segunda camada são utilizados como entradas para a terceira camada (2ª camada neural escondida). Finalmente, o conjunto de sinais de saída apresentados pelos neurônios da camada de saída reflete a resposta final da rede em relação ao vetor de entrada fornecido pelos nós fontes da primeira camada.

Entre as principais redes que utilizam a arquitetura em camadas destacam-se as redes *perceptron* (Hush, 1993 e Haykin 1994), bem como as redes funções de base radial (*Radial Basis Function* - RBF) (Haykin, 1994) e as redes *Counter-Propagation* (Hecht, 1990).

3.4.2 Redes recorrentes *feedback*

Este tipo de rede tem a mesma estrutura que a rede em camadas, no entanto, são permitidas conexões entre as saídas dos nós de um nível superior e as entradas dos nós (realimentação) de um nível inferior. Redes com realimentação são apropriadas para aplicações de identificação de sistemas (modelagem), controle, filtragem, predição não linear, etc.

As respostas de tais redes são dinâmicas, isto é, depois de aplicar um conjunto de novas entradas, as saídas são calculadas e retroalimentadas com a finalidade de modificar as entradas do instante anterior. A saída é então recalculada e o processo é

repetido iterativamente. Para uma rede estável, essas iterações sucessivas produzem mudanças nas saídas cada vez menores até que todas as saídas se tornem constantes. Para alguns tipos de redes, este processo pode se repetir indefinidamente, e tais redes são ditas instáveis (Kohonen, 1986). Redes instáveis possuem características particulares e têm sido estudadas como exemplo de sistemas caóticos. A Figura 3.13 apresenta o esquema de uma rede recorrente.

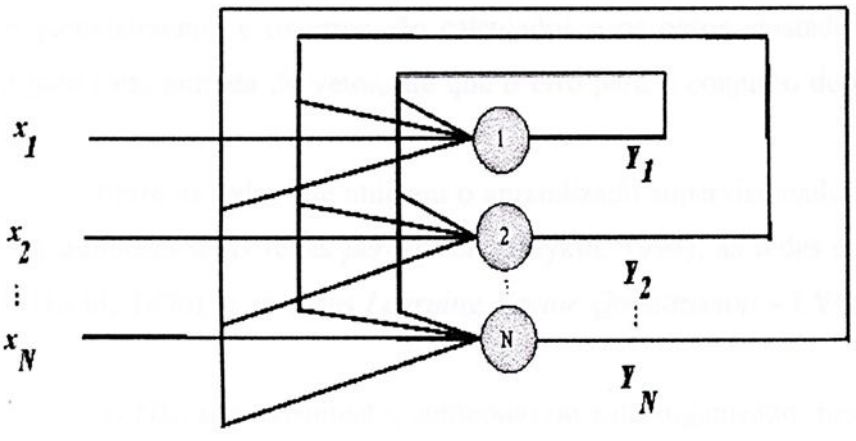


FIGURA 3.13 - Rede recorrente típica.

A rede de *Hopfield* é provavelmente o melhor exemplo conhecido de rede recorrente (Hush, 1993). Essa rede é composta por uma única camada, onde todos os neurônios são completamente interconectados, isto é, todos os neurônios são conectados a todos os outros e a si próprio (Figura 3.13).

Esta arquitetura possui as seguintes características:

1) Dinâmicas;

2) Possuem memórias;

3) Facilidade de implementação em *hardware*.

3.5 PROCESSO DE APRENDIZAGEM

O treinamento ou processo de aprendizagem de uma RNA consiste em ajustar os pesos sinápticos (matriz de pesos *w*) de forma que a aplicação de um conjunto de entradas produza um conjunto de saídas desejadas.

As situações de aprendizagem podem ser categorizadas em duas naturezas distintas, conforme já mencionado na seção terciária 3.2.1:

1) Supervisionado, associativo ou auto-supervisionado: o processo de treinamento da RNA se dá pelo fornecimento de padrões de saídas associados às respectivas entradas. Quando um vetor de entrada é apresentado, a saída da rede é calculada e comparada com o respectivo padrão de saída. A diferença (erro) é então propagada em sentido contrário ao fluxo de informações da rede (das saídas para as entradas) e os pesos são alterados de acordo com algum algoritmo que tende a minimizar o erro. Os vetores de entrada e de saída do conjunto de treinamento são aplicados seqüencialmente, e os erros são calculados e os pesos ajustados para cada vetor e não para cada entrada do vetor, até que o erro para o conjunto de treinamento seja aceitável.

Entre as redes que utilizam o aprendizado supervisionado para ajustar os seus pesos destacam-se as redes *perceptron* (Haykin, 1994), as redes de função de base radial (Hecht, 1990), e as redes *Learning Vector Quantization* - LVQ (Kohonen, 1986).

2) Não supervisionado, autônomo ou auto-organizado: neste processo de treinamento, uma unidade (de saída) é treinada a fim de reconhecer grupos de padrões dentre as entradas. No treinamento os vetores são apenas vetores de entrada. O algoritmo de treinamento modifica os pesos da rede para produzir vetores de saída que são consistentes, isto é, vetores do conjunto de treinamento que são similares entre si e produzirão o mesmo padrão de saída. Nesse tipo de aprendizagem espera-se que o sistema deva estatisticamente descobrir características e particularidades marcantes da população de entrada. Ao contrário do aprendizado supervisionado, onde não existe um conjunto à priori de categorias dentro do qual os padrões irão ser classificados, o sistema é quem deve desenvolver sua própria representação do estímulo de entrada.

As principais redes que utilizam aprendizado não supervisionado são as redes *Counter-Propagation* (Hecht, 1990) e as redes de *Kohonen* (Kohonen, 1986).

3.6 ALGORITMOS DE TREINAMENTO DA REDE *PERCEPTRON*

O algoritmo de retropropagação, ou de *backpropagation*, para redes de neurônios de múltiplas camadas foi essencialmente inventado e popularizado por Rumelhart, Hinton e Williams (Kovács, 1996). O método *backpropagation* visa fornecer os valores dos pesos w através do processo matemático de gradiente descendente. Este método é aplicado através da definição de uma função de erro



utilizada, ou função de custo. Esta função deve ser minimizada e isto ocorre de modo a obter um ajuste para o par de entrada/saída fornecida a rede neural.

Segundo Hertz[2] et. al., (1991) apud Bretas (1998) o funcionamento do algoritmo ocorre em duas etapas distintas: na primeira etapa, ocorre a propagação da informação no sentido camada de entrada para a camada de saída, em seguida, ocorre uma segunda etapa de processamento em sentido inverso (*backward)* que propaga um erro que irá modificar os pesos das conexões entre as unidades de processamento. O processamento é repetido até o critério de parada, que pode ser pelo número de épocas ou pelo erro estipulado, que é o que algoritmo realiza, ou seja, minimizar o erro entre a saída desejada e a obtida.

Para tal, ele utiliza o método do gradiente descendente, que requer funções de ativação que variem suavemente, como é o caso da função sigmóide.

3.6.1 Derivação do algoritmo *backpropagation*

A derivação do algoritmo *backpropagation*, para redes *perceptron* com uma única camada escondida é realizada conforme a notação apresentada na Figura 3.14.

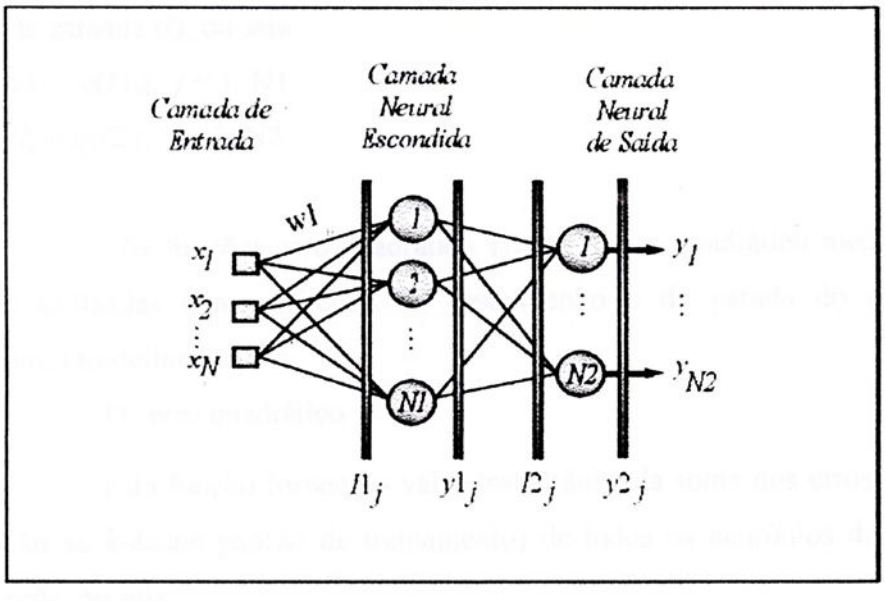


FIGURA 3.14 - Diagrama esquemático da rede *perceptron*.

[2] Hertz, J.; Krogh, A.; Palmer, R.G.. *Introduction to the theory of neural computation.* Santa Fe Institue Studies in the Sciences of Complexity, v.1, Addison-Wesley. (1991).

A partir da Figura 3.14, adota-se a seguinte convenção:

1) O parâmetro N especifica o número de variáveis que constitui cada vetor de entrada.

2) O parâmetro N1 especifica a quantidade de neurônios utilizados na camada neural escondida.

3) O parâmetro N2 especifica o número de variáveis que constitui cada vetor de saída, e também indica a quantidade de neurônios utilizados na camada neural de saída.

4) O vetor $\boldsymbol{x} = [x_1, x_2, \ldots, x_N]^T$ denota o vetor de entrada da rede.

5) O vetor $\boldsymbol{y} = [y_1, y_2, \ldots, y_{N2}]^T$ denota o vetor de saída da rede.

6) O símbolo wl_{ji} fornece o valor do peso sináptico conectando o j-ésimo neurônio da camada (l) ao i-ésimo neurônio da camada (l-1).

7) O símbolo Il_j fornece o valor correspondente à entrada ponderada do j-ésimo neurônio da camada (l), ou seja:

$$I1_j = \sum_{i=0}^{N} w1_{ji} . x_i \;, \quad j = 1..N1 \tag{3.9}$$

$$I2_j = \sum_{i=0}^{N} w2_{ji} . y1_i \;, \quad j = 1..N2 \tag{3.10}$$

8) O símbolo yl_j fornece o valor correspondente à saída do j-ésimo neurônio da camada (l), ou seja:

$$y1_j = g(I1_j), \; j = 1..N1 \tag{3.11}$$

$$y2_j = g(I2_j), \; j = 1..N2 \tag{3.12}$$

As funções erro quadrático $\{E(k)\}$ e erro quadrático médio $\{E_M\}$, as quais são utilizadas como critérios de desempenho e de parada do processo de treinamento, são definidas por:

1) erro quadrático

Esta função fornece o valor instantâneo da soma dos erros quadráticos (em relação ao k-ésimo padrão de treinamento) de todos os neurônios da camada de saída da rede, ou seja:

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N2} (d_j(k) - y2_j(k))^2 \tag{3.13}$$

onde $d_j(k)$ é o valor da saída desejada do neurônio j em relação ao k-ésimo padrão de entrada.

2) erro quadrático médio

O erro quadrático médio é obtido a partir da soma dos erros quadráticos relativos a todos os padrões de entrada utilizados no conjunto de treinamento da rede, ou seja:

$$E_M = \frac{1}{p}\sum_{k=1}^{p} E(k) \tag{3.14}$$

onde o parâmetro p especifica o número de padrões de treinamento ou a quantidade de vetores de entrada.

Assim, o objetivo do processo de aprendizagem, utilizando o algoritmo *backpropagation*, consiste em ajustar as matrizes de pesos $W1$ e $W2$ da rede a fim de minimizar a função E_M.

O processo de ajuste dos pesos pode ser dividido em duas fases como descrito a seguir:

Fase 1 - Ajuste dos pesos dos neurônios da camada de saída.

O ajuste dos pesos dos neurônios da camada de saída (2ª camada neural) é feita a partir da minimização da função erro quadrático em relação aos pesos $w2_{ji}$. Utilizando a regra da diferenciação em cadeia, tem-se:

$$\nabla E_{(W2_{ji})} = \frac{\partial E}{\partial w2_{ji}} = \frac{\partial E}{\partial y2_j} \cdot \frac{\partial y2_j}{\partial I2_j} \cdot \frac{\partial I2_j}{\partial w2_{ji}} \tag{3.15}$$

onde:

$$\frac{\partial I2_j}{\partial w2_{ji}} = y1_i \tag{3.16}$$

$$\frac{\partial y2_j}{\partial I2_j} = g'(I2_j) \tag{3.17}$$

$$\frac{\partial E}{\partial y2_j} = -(d_j - y2_j) \tag{3.18}$$

Substituindo as eqs. (3.16), (3.17) e (3.18) na eq. (3.15), obtém-se:

$$\frac{\partial E}{\partial w2_{ji}} = -(d_j - y2_j).g'(I2_j).y1_i \tag{3.19}$$

Logo, o ajuste deverá ser feito na direção oposta ao gradiente a fim de minimizar a função erro quadrático, ou seja:

$$\Delta w2_{ji} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial w2_{ji}} \tag{3.20}$$

$$\Delta w2_{ji} = -\eta \cdot \delta 2_j \cdot y1_i$$

ou ainda:

$$w2_{ji}(t+1) = w2_{ji}(t) + \eta . \delta 2_j . y1_i \tag{3.21}$$

onde η é uma constante que determina a taxa de aprendizagem do algoritmo *backpropagation*, e $\delta 2_j$ denota o gradiente local sendo auto-definido por:

$$\delta 2_j = (d_j - y2_j).g'(I2_j) \tag{3.22}$$

Fase 2 - Ajuste dos pesos dos neurônios da camada intermediária.

O ajuste dos pesos dos neurônios da camada intermediária (1ª camada neural) é feita normalmente a partir da função erro quadrático em relação aos pesos $w1_{ji}$. Utilizando a regra de diferenciação em cadeia, tem-se:

$$\nabla E_{(w1_{ji})} = \frac{\partial E}{\partial w1_{ji}} = \frac{\partial E}{\partial y1_j} \cdot \frac{\partial y1_j}{\partial I1_j} \cdot \frac{\partial I1_j}{\partial w1_{ji}} \tag{3.23}$$

onde:

$$\frac{\partial I1_j}{\partial w1_{ji}} = x_i \tag{3.24}$$

$$\frac{\partial y1_j}{\partial I1_j} = g'(I1_j) \tag{3.25}$$

$$\frac{\partial E}{\partial y1_j} = \sum_{k=1}^{N2} \frac{\partial E}{\partial I2_k} \cdot \frac{\partial I2_k}{\partial y1_j} = \sum_{k=1}^{N2} \frac{\partial E}{\partial I2_k} \cdot \frac{\partial (\sum_{k=1}^{N2} w2_{kj} \cdot y1_j)}{\partial y1_j}$$

$$= \sum_{k=1}^{N2} \frac{\partial E}{\partial I2_k} \cdot \frac{\partial (\sum_{k=1}^{N2} w2_{kj} \cdot y1_j)}{\partial y1_j} \tag{3.26}$$

Inserindo o resultado da multiplicação da eq. (3.17) pela eq. (3.18) na eq. (3.26), tem-se:

$$\frac{\partial E}{\partial y1_j} = -\sum_{k=1}^{N2} \delta 2_k \cdot w2_{kj} \tag{3.27}$$

Substituindo as eqs. (3.24), (3.25) e (3.27) na eq. (3.23), tem-se:

$$\frac{\partial E}{\partial w1_j} = (-\sum_{k=1}^{N2} \delta 2_k \cdot w2_{kj}) \cdot g'(I1_j) \cdot x_i \tag{3.28}$$

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

O ajuste deve ser feito na direção oposta ao gradiente. Então, a eq. (3.28) torna-se:

$$\Delta w1_{ji} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial w1_{ji}} \tag{3.29}$$

$$\Delta w1_{ji} = -\eta \cdot \delta 1_j \cdot x_i$$

ou ainda:

$$w1_{ji}(t+1) = w1_{ji}(t) + \eta.\delta 1_j.x_i \tag{3.30}$$

onde $\delta 1_j$ denota o gradiente local e é auto-definido por:

$$\delta 1_j = g'(I1_j) \cdot (\sum_{k=1}^{N2} \delta 2_k \cdot w2_{kj}) \tag{3.31}$$

Assim, aplicam-se a Fase 1 e Fase 2 seqüencialmente até que o erro quadrático médio da rede atinja um valor aceitável que é estipulado em função de cada aplicação específica.

3.6.2 Algoritmo de Levenberg - Marquardt

Como descrito na subseção 3.6.1, o algoritmo *backpropagation* ajusta os valores das matrizes de pesos ***W1*** e ***W2*** em relação à direção oposta do gradiente da função erro quadrático. Entretanto, a utilização desse algoritmo na prática tende a convergir muito lentamente, exigindo assim um elevado esforço computacional. Para contornar este problema várias técnicas de otimização têm sido incorporadas ao algoritmo *backpropagation* a fim de reduzir o seu tempo de convergência e diminuir o esforço computacional exigido pelo mesmo. Dentre as técnicas de otimização mais utilizadas para este propósito destaca-se o algoritmo de Levenberg - Marquardt (Hagan, 1994).

O algoritmo de Levenberg - Marquardt é uma técnica baseada no método dos mínimos quadrados para modelos não-lineares que pode ser incorporada ao algoritmo *backpropagation* a fim de aumentar a eficiência do processo de treinamento. Neste algoritmo as funções erro quadrático e erro quadrático médio fornecidas respectivamente nas eqs. (3.13) e (3.14) podem ser expressas conjuntamente por:

unesp

$$V = \frac{1}{2p} \cdot \sum_{k=1}^{p} \sum_{j=1}^{N2} \left[d_j(k) - y2_j(k) \right]^2$$

$$V = \frac{1}{2p} \cdot \sum_{k=1}^{p} (\boldsymbol{d}(k) - \boldsymbol{y2}(k))^T \cdot (\boldsymbol{d}(k) - \boldsymbol{y2}(k)$$

$$V = \frac{1}{2p} \cdot \sum_{k=1}^{p} \boldsymbol{e}^T(k) \cdot \boldsymbol{e}(k) \tag{3.32}$$

onde o termo $\{\boldsymbol{e}(k) = \boldsymbol{d}(k) - \boldsymbol{y2}(k)\}$ denota o vetor erro em relação ao k-ésimo padrão de treinamento. Para um padrão k específico o erro é dado por:

$$V = \frac{1}{2} \boldsymbol{e}^T(k) \cdot \boldsymbol{e}(k) \tag{3.33}$$

Enquanto que o algoritmo *backpropagation* é um método de descida no gradiente da função erro quadrático, o algoritmo de Levenberg - Marquardt é uma aproximação do Método de Newton (Battiti, 1992 e Foresse, 1997). Nesse método a minimização de uma função $V(\boldsymbol{z})$ em relação a um vetor paramétrico $\boldsymbol{z}$ é dada por:

$$\Delta \boldsymbol{z} = -\left[\nabla^2 V(\boldsymbol{z}) \right]^{-1} \cdot \nabla V(\boldsymbol{z}) \tag{3.34}$$

onde $\nabla^2 V(\boldsymbol{z})$ denota a matriz Hessiana e $\nabla V(\boldsymbol{z})$ é a matriz Jacobiana de $V(\boldsymbol{z})$. Assumindo-se que $V(\boldsymbol{z})$ é uma função que executa soma de funções quadráticas da forma:

$$V(\boldsymbol{z}) = \sum_{i=1}^{N} e_i^2(\boldsymbol{z}) \tag{3.35}$$

Então a partir da equação anterior, pode ser mostrado que:

$$\nabla V(\boldsymbol{z}) = \boldsymbol{J}^T(\boldsymbol{z}) \cdot \boldsymbol{e}(\boldsymbol{z}) \tag{3.36}$$

$$\nabla^2 V(\boldsymbol{z}) = \boldsymbol{J}^T(\boldsymbol{z}) \cdot \boldsymbol{J}(\boldsymbol{z}) + \boldsymbol{S}(\boldsymbol{z}) \tag{3.37}$$

onde $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{z})$ é a matriz Jacobiana definida por:

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{z}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(\boldsymbol{z})}{\partial z_1} & \frac{\partial e_1(\boldsymbol{z})}{\partial z_2} & \cdots & \frac{\partial e_1(\boldsymbol{z})}{\partial z_N} \\ \frac{\partial e_2(\boldsymbol{z})}{\partial z_1} & \frac{\partial e_2(\boldsymbol{z})}{\partial z_2} & \cdots & \frac{\partial e_2(\boldsymbol{z})}{\partial z_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_N(\boldsymbol{z})}{\partial z_1} & \frac{\partial e_N(\boldsymbol{z})}{\partial z_2} & \cdots & \frac{\partial e_N(\boldsymbol{z})}{\partial z_N} \end{bmatrix} \tag{3.38}$$

e $\boldsymbol{S}(\boldsymbol{z})$ é uma função dada por:

$$\boldsymbol{S}(z) = \sum_{i=1}^{N} e_i(z)\nabla^2 e_i(z) \tag{3.39}$$

Inserindo-se os resultados das eqs. (3.36) e (3.37) na eq. (3.34), obtém-se a equação iterativa do método de Newton, ou seja:

$$\Delta z = \left[\boldsymbol{J}^T(z).\boldsymbol{J}(z) + \boldsymbol{S}(z)\right]^{-1}.\boldsymbol{J}^T(z).\boldsymbol{e}(z) \tag{3.40}$$

No algoritmo de Levenberg - Marquardt a equação (3.40) é modificada da seguinte forma:

$$\Delta z = \left[\boldsymbol{J}^T(z).\boldsymbol{J}(z) + \mu \boldsymbol{I}\right]^{-1}.\boldsymbol{J}^T(z).\boldsymbol{e}(z) \tag{3.41}$$

onde $\boldsymbol{I}$ é a matriz identidade e μ é um parâmetro que ajusta a taxa de convergência do algoritmo de Levenberg - Marquardt.

Portanto, a característica principal deste algoritmo é a computação da matriz Jacobiana. Para o processo de treinamento das redes neurais do tipo p*erceptron* utilizadas neste trabalho e ilustrada na Figura 3.14, a matriz Jacobiana (eq.(3.38)) passa então a ser reescrita em função dos pesos sinápticos da rede, ou seja:

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{w}) = \left[\boldsymbol{J}(\boldsymbol{w}1) \mid \boldsymbol{J}(\boldsymbol{w}2)\right]_{(p)x(N.N1+N1.N2)} \tag{3.42}$$

onde:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{w} &= \left[\boldsymbol{w}1 \mid \boldsymbol{w}2\right] \\ &= [\boldsymbol{w}1_{1,1} \ldots \boldsymbol{w}1_{1,N} \quad \boldsymbol{w}1_{2,1} \ldots \boldsymbol{w}1_{2,N} \quad \cdots \quad \boldsymbol{w}1_{N1,1} \ldots \boldsymbol{w}1_{N1,N} \mid \\ &\boldsymbol{w}2_{1,1} \cdots \boldsymbol{w}2_{1,N1} \quad \boldsymbol{w}2_{2,1} \cdots \boldsymbol{w}2_{2,N1} \quad \cdots \quad \boldsymbol{w}2_{N2,1} \cdots \boldsymbol{w}2_{N2,N1}]^T_{(N.N1+N1.N2)x(1)} \end{aligned} \tag{3.43}$$

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{w}1) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e(1)}{\partial w1_{1,1}} \cdots \frac{\partial e(1)}{\partial w1_{1,N}} & \frac{\partial e(1)}{\partial w1_{2,1}} \cdots \frac{\partial e(1)}{\partial w1_{2,N}} & \cdots & \frac{\partial e(1)}{\partial w1_{N1,1}} \cdots \frac{\partial e(1)}{\partial w1_{N1,N}} \\ \frac{\partial e(2)}{\partial w1_{1,1}} \cdots \frac{\partial e(2)}{\partial w1_{1,N}} & \frac{\partial e(2)}{\partial w1_{2,1}} \cdots \frac{\partial e(2)}{\partial w1_{2,N}} & \cdots & \frac{\partial e(2)}{\partial w1_{N1,1}} \cdots \frac{\partial e(2)}{\partial w1_{N1,N}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e(p)}{\partial w1_{1,1}} \cdots \frac{\partial e(p)}{\partial w1_{1,N}} & \frac{\partial e(p)}{\partial w1_{2,1}} \cdots \frac{\partial e(p)}{\partial w1_{2,N}} & \cdots & \frac{\partial e(p)}{\partial w1_{N1,1}} \cdots \frac{\partial e(p)}{\partial w1_{N1,N}} \end{bmatrix}_{(p)x(N.N1)} \tag{3.44}$$

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

$$J(w2)=\begin{bmatrix} \frac{\partial e(1)}{\partial wl_{1,1}}\cdots\frac{\partial e(1)}{\partial w2_{1,N1}} & \frac{\partial e(1)}{\partial w2_{2,1}}\cdots\frac{\partial e(1)}{\partial w2_{2,N1}} & \cdots & \frac{\partial e(1)}{\partial w2_{N2,1}}\cdots\frac{\partial e(1)}{\partial w2_{N2,N1}} \\ \frac{\partial e(2)}{\partial w2_{1,1}}\cdots\frac{\partial e(2)}{\partial w2_{1,N1}} & \frac{\partial e(2)}{\partial w2_{2,1}}\cdots\frac{\partial e(2)}{\partial w2_{2,N1}} & \cdots & \frac{\partial e(2)}{\partial w2_{N2,1}}\cdots\frac{\partial e(2)}{\partial w2_{N2,N1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e(p)}{\partial w2_{1,1}}\cdots\frac{\partial e(p)}{\partial w2_{1,N1}} & \frac{\partial e(p)}{\partial w2_{2,1}}\cdots\frac{\partial e(p)}{\partial w2_{2,N1}} & \cdots & \frac{\partial e(p)}{\partial w2_{N2,1}}\cdots\frac{\partial e(p)}{\partial w2_{N2,N1}} \end{bmatrix}_{(p)x(N1.N2)} \quad (3.45)$$

A partir da eq. (3.41), a equação iterativa do método de Levenberg - Marquardt para o ajuste dos pesos da rede passa a ser definida por:

$$\Delta z=\left[J^T(W).J(W)+\mu I\right]^{-1}.J^T(W).e(W) \quad (3.46)$$

onde $e(W)=[e_1(W),e_2(W),\ldots e_p(W)]^T{}_{(p)x(1)}$ é o vetor erro (em relação à matriz W) referente aos p padrões de treinamento.

Finalmente, os elementos das matrizes $J(W1)$ e $J(W2)$ são obtidos seqüencialmente a partir das Fases 1 e 2 do algoritmo *backpropagation* apresentado na subseção 3.6.1. Com estas modificações comprova-se que o algoritmo de Levenberg - Marquardt torna-se de 10 a 100 vezes mais rápido que o algoritmo *backpropagation* convencional.

3.6.3 Algoritmo de Levenberg regularizado

Um dos problemas que ocorrem durante o treinamento de redes neurais do tipo *perceptron* é denominado de *overfitting*. Quando acontece *overfitting*, o erro quadrático médio dos padrões de treinamento é muito pequeno, mas quando novos padrões (que não pertenciam ao conjunto de treinamento) são apresentados à rede, o erro torna-se muito grande. Este fato ocorre porque a rede memorizou apenas os padrões de treinamento, mas não conseguiu generalizar novas situações.

O problema do *overfitting* normalmente acontece quando a disponibilidade de dados usados no treinamento da rede é pequena. Um dos métodos para melhorar a generalização é o método de Levenberg regularizado, e que consiste em modificar a função erro quadrático médio da rede.

A partir da eq. (3.32), tem-se:

$$V=\frac{1}{2p}.\sum_{k=1}^{p}e^T(k).e(k) \quad (3.47)$$

A generalização é melhorada se incluir também na eq. (3.47) o erro quadrático médio dos pesos (*Vpeso*) que compõem a rede. Então, a nova função erro quadrático médio regularizado (V_{REG}) é definida por:

$$V_{REG} = \gamma V + (1-\gamma) Vpeso \tag{3.48}$$

onde o parâmetro γ especifica a taxa de desempenho, e o termo *Vpeso* é definido por:

$$Vpeso = \frac{1}{q}\sum_{j,i} W_{ji} \tag{3.49}$$

onde W_{ji} são os pesos da rede e q é a quantidade total de pesos que compõem a rede. Portanto, a utilização da eq. (3.48) implica que os pesos da rede serão menores, e esta característica forçará que a resposta da rede seja suavizada e menos propensa ao *overfitting*.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÕES NO SISTEMA ELÉTRICO

4.1 INTRODUÇÃO

Os transitórios, dependendo da velocidade, podem ser agrupados em três classificações, segundo Elgerd (1978):

1) Classe A - transitórios ultra-rápidos - fenômenos de surto;
2) Classe B - transitórios meio-rápidos - fenômeno de curto-circuito;
3) Classe C - transitórios lentos.

Operações de chaveamento, faltas, descargas atmosféricas e outros distúrbios intencionais e não intencionais causam sobretensões temporárias no sistema de potência.

O sistema deve resistir a estas sobretensões e seus efeitos reduzidos e limitados com dispositivos de proteção. Segundo o que Dommel & Meyer (1974) relatam, os fenômenos de tensão de restabelecimento no início se dá no tempo de microsegundos, surtos de chaveamento no tempo de milisegundos e os de ferroressonância em torno de ciclos.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Pela natureza, estes fenômenos são uma combinação de ondas viajantes nas linhas de cabos aéreos e de oscilações em circuitos concentrados dos geradores, transformadores e outros dispositivos.

Para distingui-los de uma oscilação eletromecânica de gerador em estudo de estabilidade transitória, eles devem ser chamados "transientes eletromagnéticos".

4.1.1 Ferramentas para simulação de transitórios

O estudo de fenômenos transitórios em sistemas elétricos pode ser realizado através de modelos em escala reduzida, de simuladores analógicos, digitais ou simuladores híbridos.

Os simuladores analógicos, atualmente pouco utilizados, foram tradicionalmente utilizados para a simulação de transitório em redes elétricas. Geralmente são conhecidos por Analisadores de Transitórios em Redes (*Transient Network Analyser* (TNA)).

Por outro lado, pode-se afirmar que não há grandes limitações para a modelagem de qualquer componente do sistema elétrico em programas digitais.

Com a evolução dos computadores e devido aos custos envolvidos, constata-se que a tendência atual para a simulação de transitórios está nos simuladores digitais.

No sistema de energia elétrica de Itaipu (Estado do Paraná, Brasil) esta técnica tem sido amplamente utilizada, ou seja, os casos foram selecionados no TNA e reprocessados no *software Eletromagnetic Transient Program* (EMTP) para obtenção dos valores nas especificações (Amom & Pereira, 1996).

Segundo os mesmos autores, o programa de transitórios eletromagnéticos EMTP, da Bonneville Power Administration (BPA), EMTP, foi desenvolvido por Herman W. Dommel na década de 60, com base no trabalho de Frey e Althammer (Brown Boveri, Switzerland, em Munique, Alemanha). No inicio, o programa só trabalhava com circuitos monofásicos. Os elementos concentrados utilizavam a regra de integração trapezoidal e as linhas de transmissão o método de Bergeron.

A partir de 1973 Dommel foi para a University de British Columbia (UBC) e Scott Meyer assumiu a coordenação do desenvolvimento do programa na BPA.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

A coordenação da BPA, através de Scott Meyer estabeleceu um processo de desenvolvimento articulado com os usuários do EMTP, que tornou o programa uma ferramenta bastante poderosa para a execução do estudos dos fenômenos transitórios.

Ainda segundo Amon & Pereira (1996), em 1984, o Electric Power Research Institute (EPRI) investiu no programa. Criou-se um grupo, com várias participações, dentre elas a da BPA, Western Area Power Administration, Hydro Quebec e outras, afim de produzir melhorias.

Devido as divergências entre Scott Meyer e EPRI criou-se uma nova versão do EMTP (baseada na versão M39) que foi enviada para a Bélgica, onde foi instalado o Leuven EMTP Center (LEC).

Esta nova versão é denominada *Alternative Transient Program* (ATP Rule Book), que nada mais é do que uma continuação das versões anteriores do programa EMTP. Conforme cita Amon & Pereira (1996), o programa permite a representação de não linearidade, elementos com parâmetros concentrados ou distribuídos, chaves, transformadores, etc. De uma forma geral, são considerados parâmetros em componente de fase em seqüência zero e positiva, dependendo do modelo.

4.2 CONFIGURAÇÃO UTILIZADA NO ESTUDO

A configuração do SDEE utilizada consiste de três ramos (ou ramais) de comprimentos diferentes, alimentada pela barra *P*, sendo esta barra energizada pelo Sistema Elétrico de Potência (SEP), com valores de parâmetros, compatíveis com os sistemas reais, conforme indica a Figura 4.1.

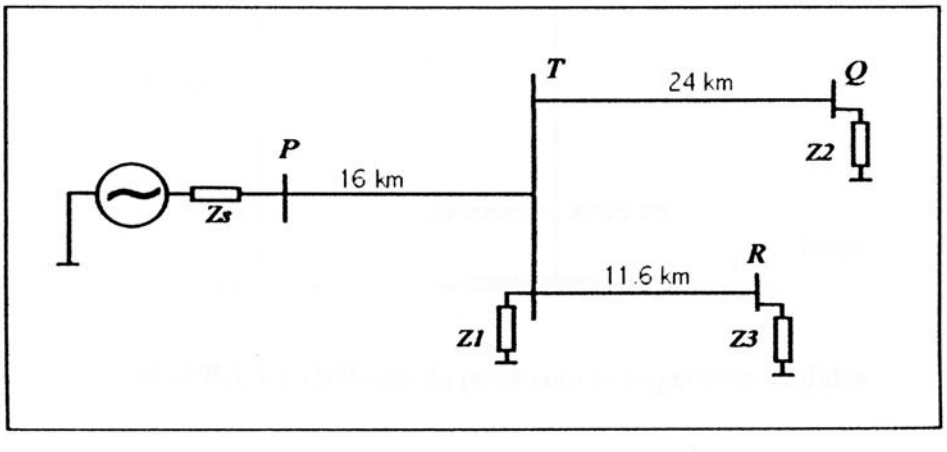


FIGURA 4.1 - Configuração do sistema de distribuição utilizada.

4.2.1 Configuração geométrica da linha de distribuição

A Figura 4.2 mostra o perfil de um poste de sustentação da linha de distribuição utilizada e a Figura 4.3 a silhueta deste, com os respectivos espaçamentos e altura relativa ao solo. Estas medidas foram utilizadas nos cálculos das capacitâncias, através da rotina *Line Constants* do *software* ATP.

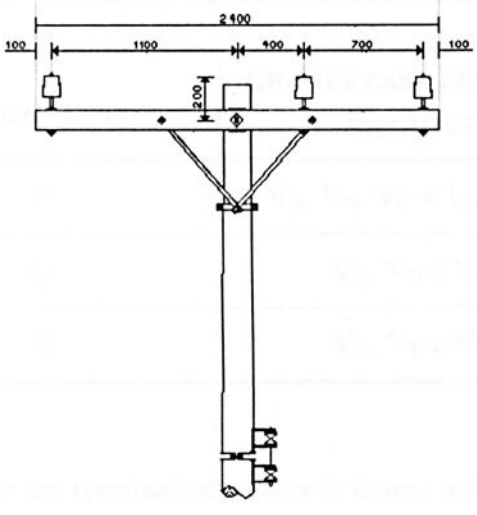


FIGURA 4.2 - Poste de sustentação dos condutores.

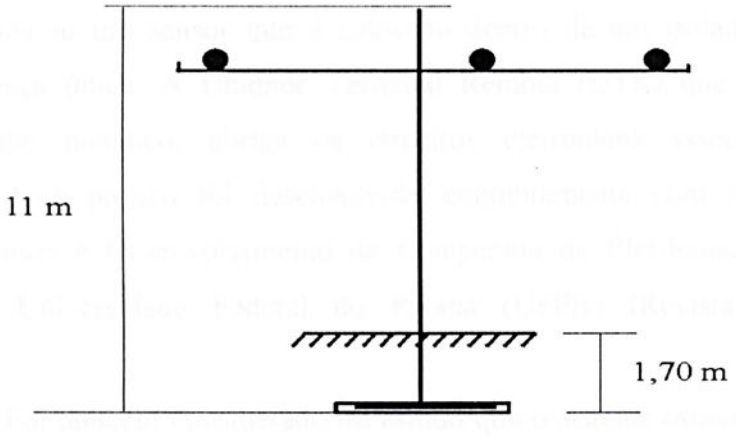


FIGURA 4.3 - Silhueta do poste com as respectivas medidas.

As linhas de distribuição conforme já mencionado são radiais, em alguns casos interligadas com outros sistemas (co-geração).

Neste trabalho a linha é classe 15 kV, alimentada em 13,8 kV, por um transformador com ligação estrela-delta-estrela e os barramentos ou terminais dos trechos são chamados de *P,T,Q* e *R* e as fases da linha chamadas de fases *A*, *B* e *C*.

As grandezas elétricas medidas estão mostradas na Tabela 4.1

Tabela 4.1 - Grandezas medidas durante as simulações

BARRAMENTO	GRANDEZAS ELÉTRICAS MEDIDAS
P	V_A, V_B, V_C e I_A, I_B, I_C
Q	V_A, V_B e V_C
R	V_A, V_B e V_C

Medições em terminais distantes já é uma prática antiga no sistema de transmissão. No sistema de transmissão/distribuição há muitas subestações desassistidas (sem operador) e toda medição, comando e controle é feito através das Unidades Terminais Remotas (UTRs).

No sistema de distribuição a utilização desse sistema é recente. A empresa Relm Chatral, especializada em tecnologia de radiocomunicação, em recente publicação, apresentou um sensor que é colocado dentro de um isolador tipo pino, formando uma peça única. A Unidade Terminal Remota (UTR) que é ligada aos sensores por cabo metálico, abriga os circuitos eletrônicos associados e um radiotransceptor. Este projeto foi desenvolvido conjuntamente com o Laboratório Central de Pesquisas e Desenvolvimento da Companhia de Eletricidade do Paraná (COPEL) e da Universidade Federal do Paraná (UFPR) (Revista Eletricidade Moderna,1999).

Foi também considerado no estudo que o sistema estava alimentando cargas localizadas nas barras *T,Q* e *R*, conforme mostra a Tabela 4.2

Tabela 4.2 - Valores das cargas conectadas no sistema

BARRAMENTO	RESISTENCIA (ohm)	INDUTÂNCIA (mH)
P	2848	3777
Q	6942	3204
R	2023	2384

4.2.2 Condutores Utilizados

1) Entre as barras *P-T* e *T-Q*:
   tipo: Merlin (18x1) - ACSR
   diâmetro do aço: 3.47 mm
   diâmetro do cabo: 17.25 mm
   relação T/D - ((diam. cabo - diam.aço)/2)/diam. cabo: 0.399
   R_{cc} (20 °C): 0.16916 ohm/km

2) Entre as barras *T-R*:
   tipo: Sparrow (6x1) ACSR
   diâmetro do aço: 2.67 mm
   diâmetro do cabo: 8.01 mm
   relação T/D: 0.333
   Rcc (20 °C): 0.85413 ohm/km
   Resistividade do solo utilizada: 250 ohm x metro

Os dados da configuração e dos condutores foram obtidos da norma de Projetos de Redes Aéreas da ELEKTRO - Eletricidade e Serviços S.A. e das tabelas de cabos da Phelps Dodge - ALCOA Fios e Cabos Elétricos S.A.

Por ser a falta fase-terra a de maior ocorrência nos sistemas de energia elétrica, esta foi adotada nesta pesquisa. O valor da resistência de falta utilizado foi de cinco ohms. Também foi adotado o ângulo de incidência de falta de 90 graus.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

4.3 PARÂMETROS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Visando a representação de uma situação de linha real em operação foi adotada a representação por parâmetros distribuídos para a simulação, que considera a linha como uma associação de resistências e indutâncias séries e capacitâncias em derivação, por unidade de comprimento, conectadas conforme esquema apresentado na Figura 4.4.

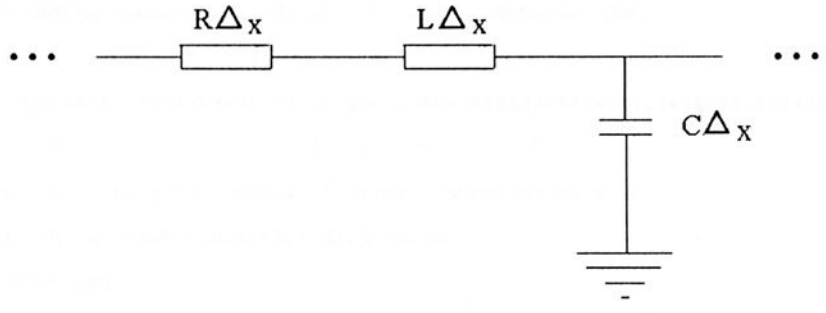


FIGURA 4.4 - Elemento de uma linha representada por parâmetros distribuídos.

4.3.1 Rotina *Line Constants*

Os parâmetros distribuídos e constantes R, L e C, vistos na Figura 4.4, são a resistência, indutância e capacitância por unidade de comprimento. A rotina *Line* Constants do ATP, permite determinar estes valores. Nesta dissertação a rotina acima mencionada foi utilizada somente para determinar os valores das capacitâncias shunt.

A rotina calcula as matrizes, em componentes simétricas ou de fase, das resistências, indutâncias e capacitâncias de uma configuração arbitrária de cabos aéreos de uma ou mais linhas.

Na Figura 4.5 apresenta-se o arquivo de entrada da rotina *Line Constants* que possui informações da configuração geométrica da linha, resistividade do solo, condições da linha (com ou sem transposição), freqüência em que os parâmetros são calculados, número de condutores por fase, etc. Os valores das capacitâncias obtidos na rotina, são devidamente inseridos no arquivo de entrada de dados para simulação das faltas.

BEGIN NEW DATA CASE

```
C CALCULO DE PARAMETROS DE LINHAS PARA SIMULACOES - FREQ. 600 HZ

C cabo 336.4 - MERLIN - (18ALX1ACO)

LINE CONSTANTS

METRIC

C        1         2         3         4         5         6         7         8

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
  1  0.4 0.16916 4           1.735    -0.9     10.8     10.6
  2  0.4 0.16916 4           1.735     0.3     10.8     10.6
  3  0.4 0.16916 4           1.735     0.9     10.8     10.6

BLANK card ending conductor cards within "LINE CONSTANTS" data

C        1         2         3         4         5         6         7         8

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

 100.        600.0                1   1    0

BLANK card ending frequency cards of "LINE CONSTANTS" data

BLANK card ending "LINE CONSTANTS" data cases

BEGIN NEW DATA CASE

BLANK
```

FIGURA 4.5 - Arquivo de dados da rotina *line constants*.

4.3.2 Arquivo de entrada de dados do ATP

Para a elaboração do arquivo principal de simulação das faltas no ATP, foi montado um esquema (Figura 4.6) onde estão as resistências, indutâncias, capacitâncias, barramentos, resistências de falta, chaves (pontos dos curtos-circuitos), etc. Cada trecho da linha é dividido em duas partes, para facilitar a escolha dos demais pontos de simulação de faltas.

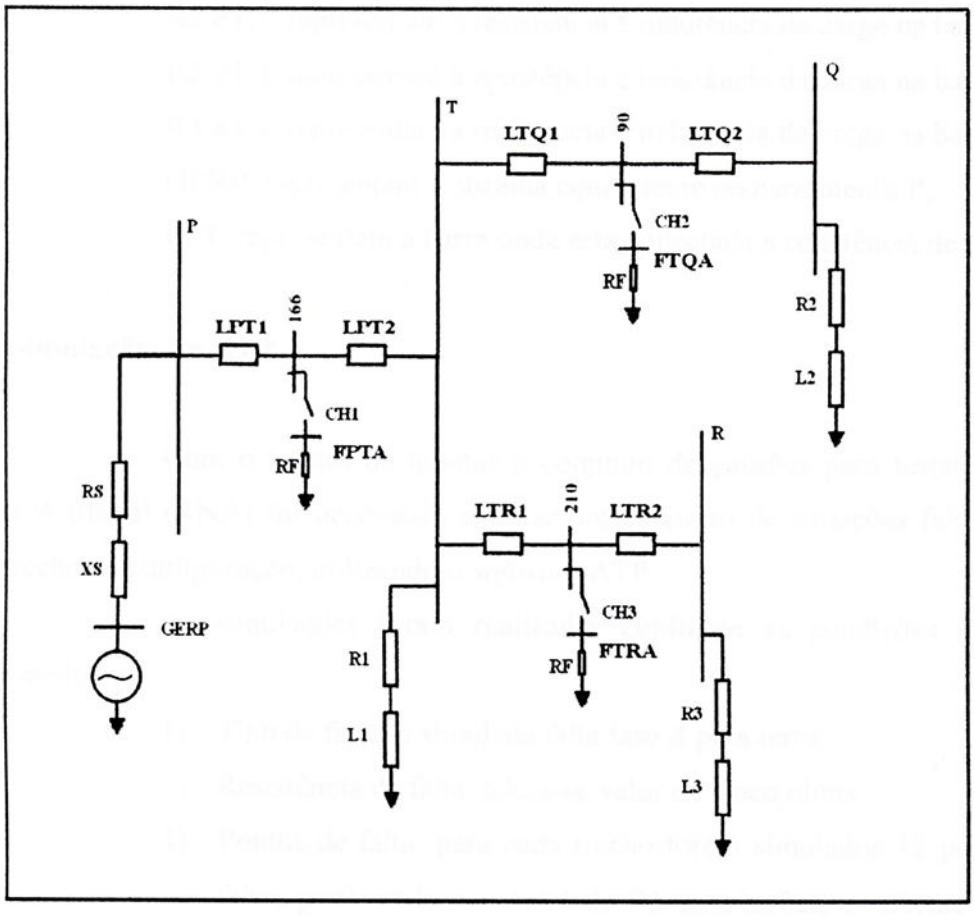


FIGURA 4.6 - Configuração da linha de distribuição modelada para o uso do ATP.

Da Figura 4.6, tem-se:

RS e XS: representam os circuitos R e L acoplados (resistências e indutâncias) equivalentes da geração na barra *P*;

LPT1 e LPT2: representam os trechos da linha separadas pela barra 166, seguida da chave CH1 e barra FPT, onde se acha conectada a resistência de falta (terra) RF;

LTQ1 e LTQ2: representam os trechos da linha separadas pela barra 90, seguida da chave CH2 e da barra FTQ, onde se acha conectada a resistência da terra RF;

LTR1 e LTR2: representam os trechos da linha separadas pela barra 210, seguida da chave CH3 e da barra FTR, onde se acha conectada a resistência da terra RF;

CH1, CH2 e CH3: são chaves controladas por tempo;

RF: representam a resistência de falta;

R1 e L1: representam a resistência e indutância da carga na barra T;

R2 e L2: representam a resistência e indutância da carga na barra Q;

R3 e L3: representam a resistência e indutância da carga na barra R;

GERP: representam o sistema equivalente no barramento P;

FPT: representam a barra onde está conectada a resistência de falta;

4.3.3 Simulações no ATP

Com o intuito de montar o conjunto de padrões para testar a Rede Neural Artificial (RNA) foi necessário simular um conjunto de situações faltosas em cada trecho da configuração, utilizando o *software* ATP.

As simulações foram realizadas conforme as condições a seguir mencionadas:

1) Tipo de falta: é simulada falta fase *A* para terra.
2) Resistência de falta: adota-se valor de cinco ohms.
3) Pontos de falta: para cada trecho foram simulados 12 pontos de falta, perfazendo um total de 36 simulações, conforme abaixo especificado.

   Trecho *PT*: 0.1, 1, 2, 4, 6, 8 ,10, 12, 13, 14, 15, 15.8 km da barra *P*.

   Trecho *TQ*: 0.1, 1, 2, 3, 5, 7, 11, 15, 20, 22, 23, 23.8 km da barra *T*.

   Trecho *TR*: 0.1, 0.5, 1, 2, 4, 5.5, 5.9, 8, 10, 11, 11.6 km da barra *T*.
4) Angulo de incidência da falta: 90 graus
5) Tensão de pré-falta, na barra *P*: 14,5 kV

4.4 METODOLOGIA UTILIZADA

Conforme já citado no Capítulo 2, o Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) possui em sua grande maioria linhas aéreas (alimentadores), em configuração radial. A configuração objeto deste estudo, também é radial, com o sistema de potência supridor conectado na barra *P* (Figura 4.1).

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

O método está baseado em utilizar as formas de ondas das tensões e correntes, para através da amostragem, obter o padrões de treinamento da Rede Neural Artificial (RNA). Na barra P mediu-se as tensões e correntes trifásicas, enquanto nas barras Q e R apenas as tensões trifásicas.

O sistema foi parametrizado com as capacitâncias *shunt* da linha, procurando assim aproximar-se o máximo possível do sistema real de distribuição de energia elétrica.

A Figura 4.7 apresenta o diagrama de blocos do algoritmo e metodologia utilizados para localizar o trecho em falta na configuração em estudo.



FIGURA 4.7 - Fluxograma da metodologia utilizada.

O primeiro passo é efetuar a amostragem dos sinais trifásicos das tensões e corrente na barra *P* e das tensões trifásicas nas barras *Q* e *R* para a situação de regime permanente. As Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam as formas de ondas das tensões e correntes obtidas dos arquivos gerados pelo *ATP*, nos respectivos pontos de medições, para a condição de regime permanente.

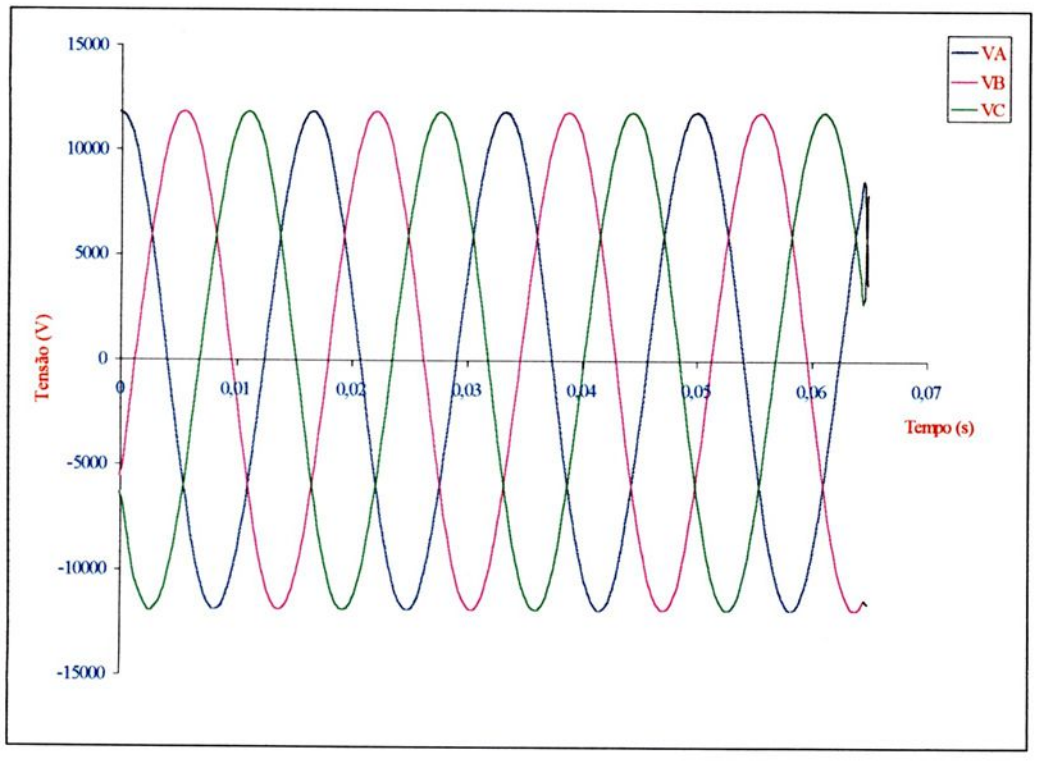


FIGURA 4.8 - Formas de ondas das tensões medidas na barra *P* para uma situação de regime permanente.

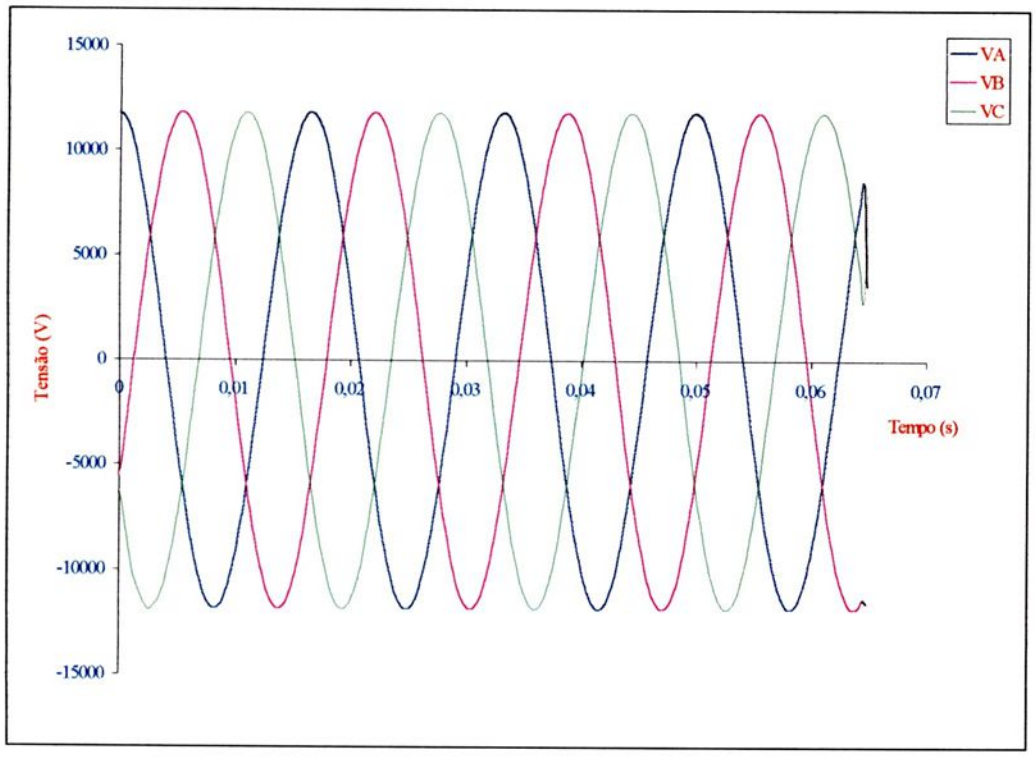


FIGURA 4.9 - Formas de ondas das tensões medidas na barra *Q* para uma situação de regime permanente.

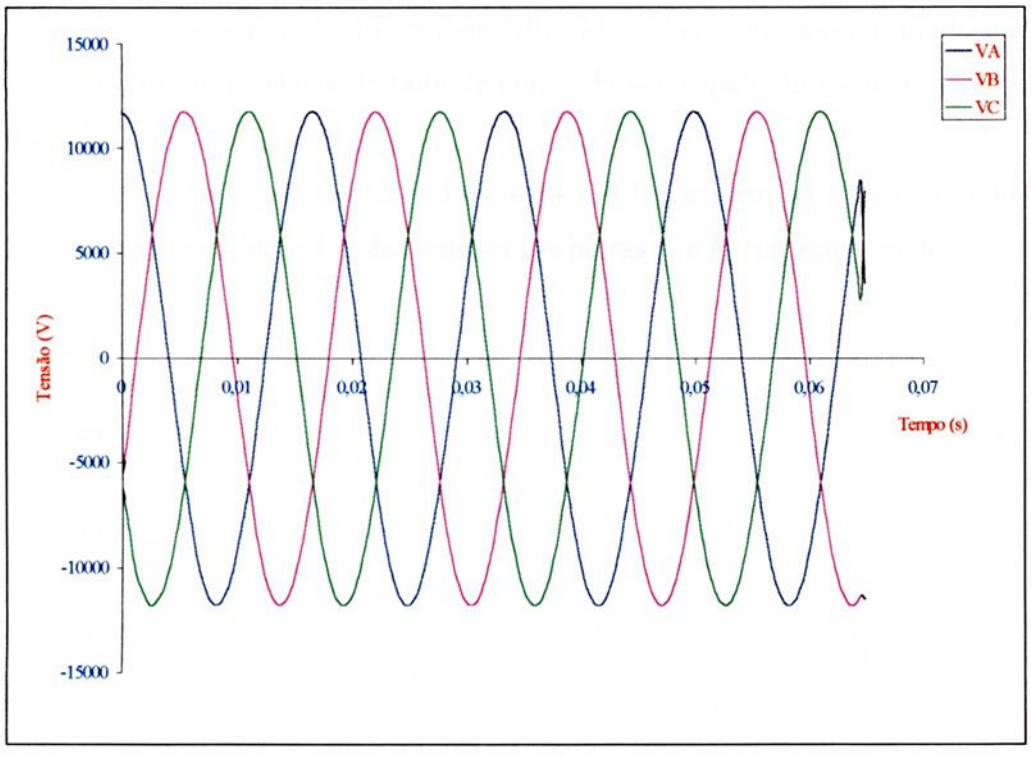


FIGURA 4.10 - Formas de ondas das tensões medidas na barra R para uma situação de regime permanente.

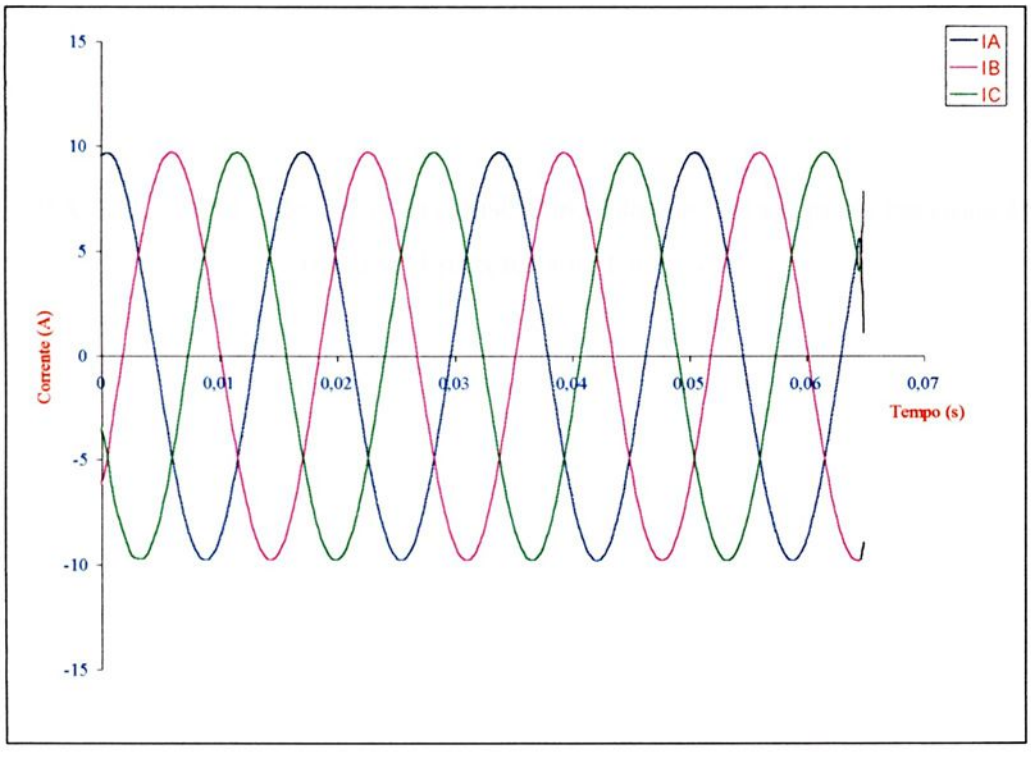


FIGURA 4.11 - Formas de ondas das correntes medidas na barra *P* para uma situação de regime permanente.

A seguir simula-se uma falta fase *A* para terra em um ponto entre as barras *P* e *T*, com impedância de falta de cinco ohms e ângulo de incidência de defeito de 90 graus.

As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 e 4.15, exibem as formas de onda das tensões e correntes na barra *P* e das tensões nas barras *Q* e *R*, respectivamente.

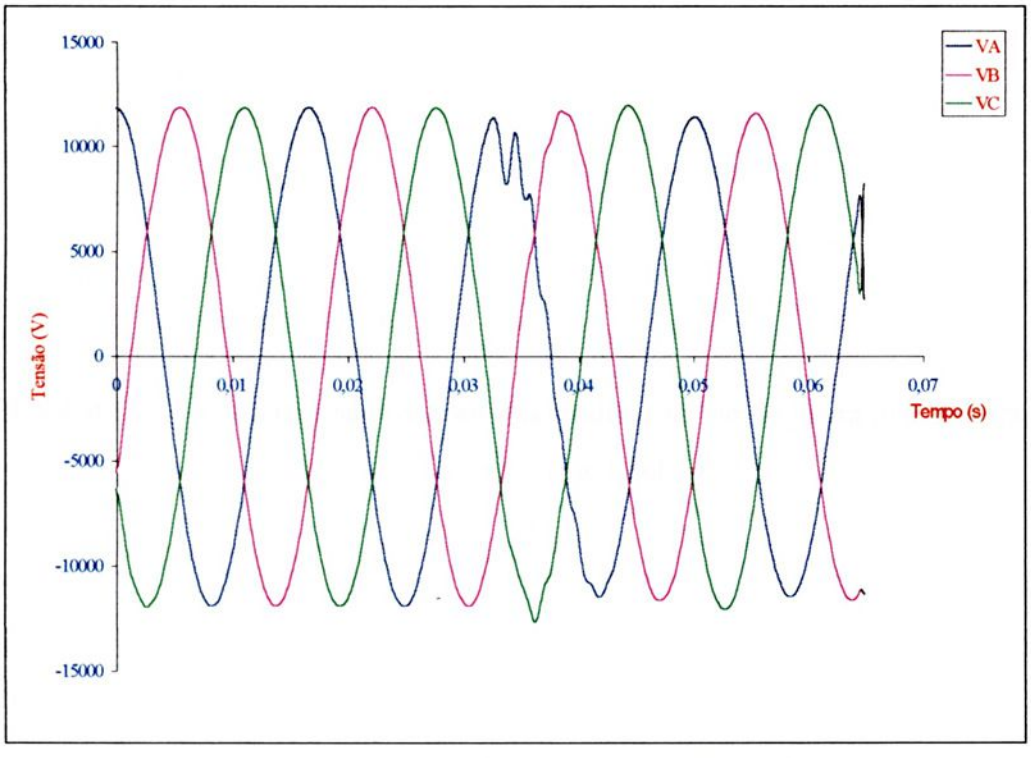


FIGURA 4.12 - Formas de ondas das tensões medidas na barra *P* para uma situação de falta fase *A* para terra no trecho *P*-*T*.

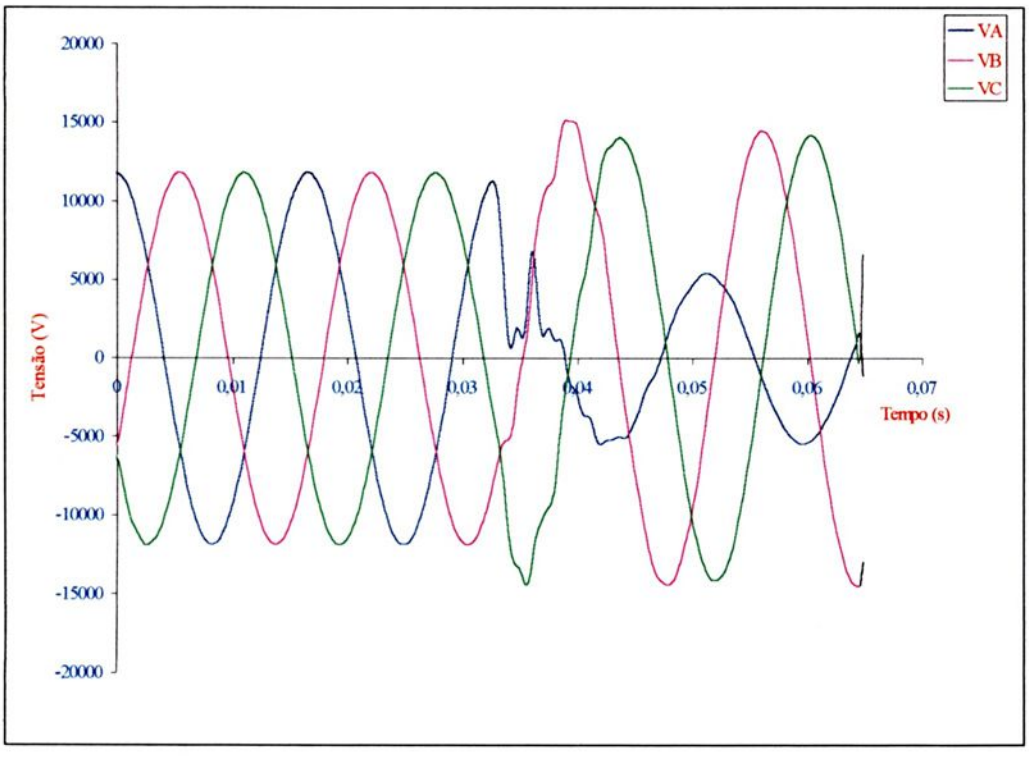


FIGURA 4.13 - Formas de ondas das tensões medidas na barra *Q* para uma situação de falta fase *A* para terra no trecho *P-T*.

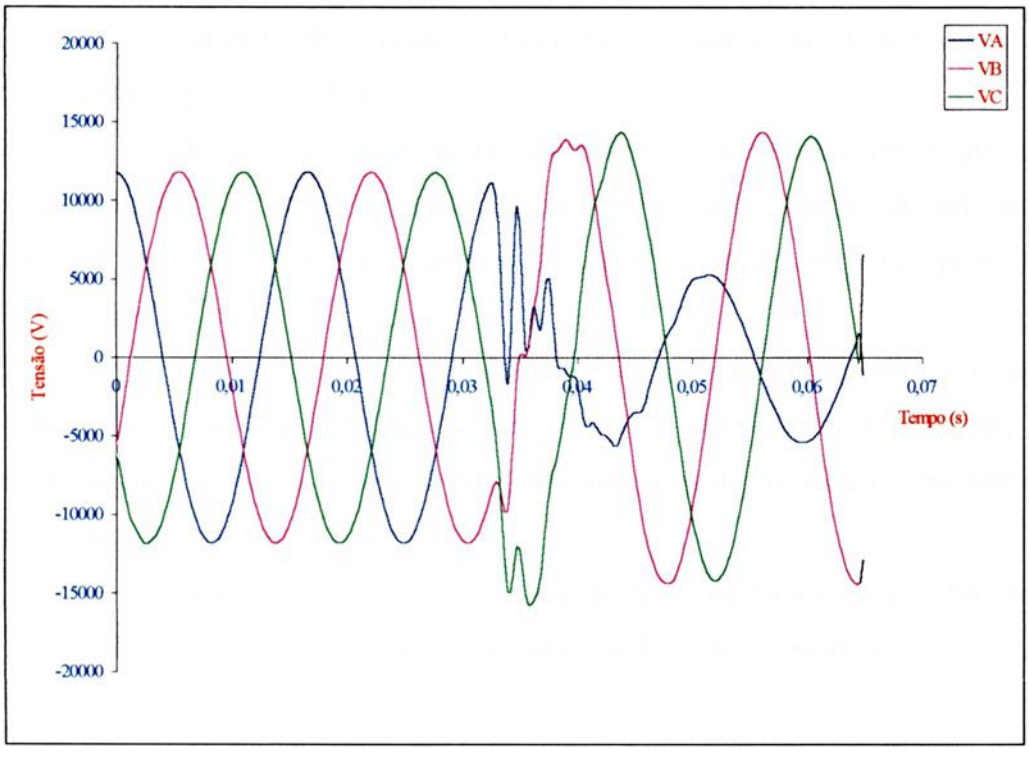


FIGURA 4.14 - Formas de ondas das tensões medidas na barra *R* para uma situação de falta fase *A* para terra no trecho *P-T*.

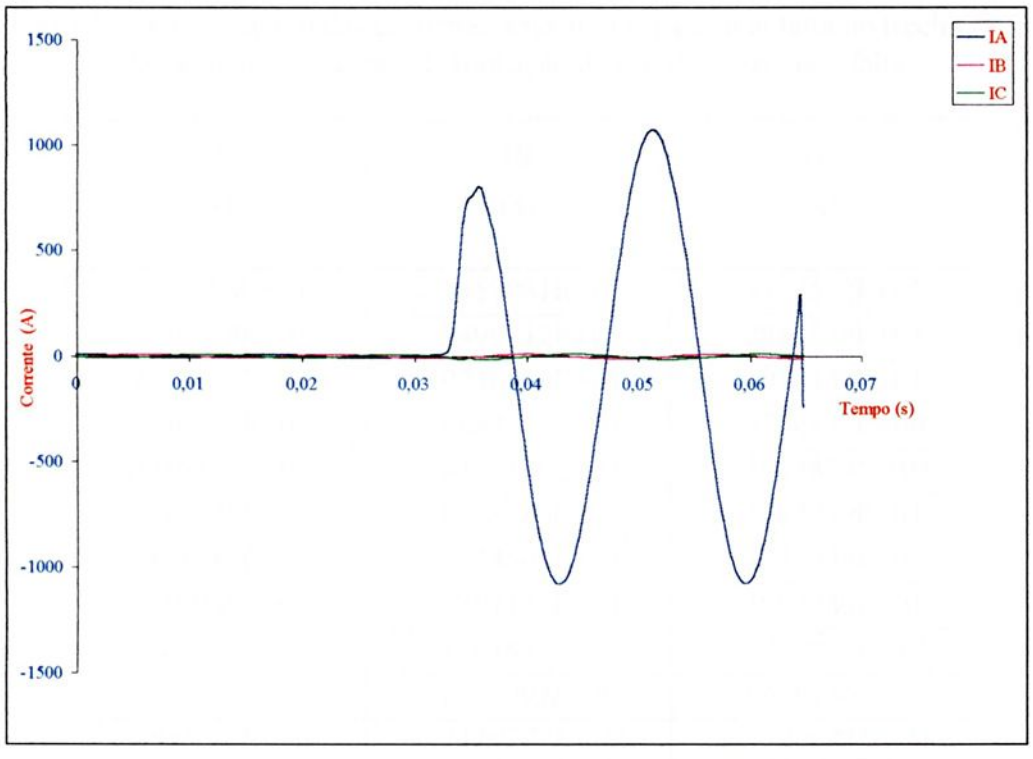


FIGURA 4.15 - Formas de ondas das correntes medidas na barra *P* para uma situação de falta fase *A* para terra no trecho *P-T*.

Na etapa de detecção da falta são utilizadas as amostras das correntes para determinar a posição da falta.

Através da distorção das formas de ondas das correntes, que estão sendo medidas na barra *P*, é verificado se esta sofreu uma variação de pelo menos quatro vezes o seu valor anterior. O critério faz a verificação nas três fases, pois não se sabe se o defeito ocorreu em *A*, *B* ou *C*.

Para uma maior confiabilidade e segurança, após atendido o requisito do aumento no valor da corrente, são verificadas as próximas três amostras, para realmente decidir se houve ou não a falta. Mantida a evolução da corrente, têm-se a transição entre pré e pós-falta .

A Tabela 4.3 ilustra com um arquivo de dados amostrados referente a uma falta na linha, o ponto onde a alteração do valor da corrente ocorreu.

TABELA 4.3 - Arquivo das correntes amostradas para uma falta no trecho *P-T*, destacando-se o ponto de transição de pré-falta para pós-falta.

IA (A)	**IB** (A)	**IC** (A)
.5922368E+01	- .9659981E+01	- .3737592E+01
.6649159E+01	- .9490712E+01	- .2841538E+01
.7312431E+01	- .9230790E+01	- .1918340E+01
.7946669E+01	- .8883017E+01	- .9764873E+00
.8936335E+01	- .8460150E+01	- .1553877E +01
.1215176E+02	- .8018186E+01	- .1007279E+01
.2341515E+02	- .7724501E+01	- .2245348E+01
.5510985E+02	- .7892130E+01	- .3997080E+01
.1245065E+03	*- .8803647E+01*	*- .6529933E+01*
.2431254E+03	*- .1024991E+02*	*- .9619286E+01*
.4009238E+03	*- .1119777E+02*	*- .1221625E+02*
.5612073E+03	- .1029312E+02	- .1295090E+02
.6798740E+03	- .7185246E+01	- .1145681E+02
.7381704E+03	- .3328757E+01	- .9173195E+01

Dependendo da análise que se quer fazer e o algoritmo a ser utilizado, a extração dos fasores fundamentais da tensão e corrente é extremamente importante no sentido de atingir um alto grau de precisão na localização da falta, pois as formas de ondas de pós-falta podem conter significantes transitórios, desde nível de corrente contínua (CC) até altas freqüências (Domingues, 1998).

Na prática, estes níveis transitórios são atenuados pelos transdutores e filtros passa-baixa, porém, os registradores podem conter ainda componentes de freqüência significativos que serão introduzidos no processamento do algoritmo de localização de falta. Para isso emprega-se técnicas de filtragem digital.

Um dos métodos empregados é a aplicação da Transformada Discreta de Fourier (TDF) que fornece a magnitude e o ângulo de fase do fasor fundamental, sendo a equação geral apresentada na eq.(4.1) (Burrus & Parks, 1985).

$$X_{v,i}(\omega) = (2/N)\sum_{n=0}^{N-1}\left[X_{v,i}(n)\{\cos(\omega n\Delta T) - j\sin(\omega n\Delta T)\}\right] \qquad (4.1)$$

Onde:

N = número de amostras por ciclo;

ΔT = intervalo de tempo entre amostras;

ω = freqüência angular em Hz do fator a ser extraído;

$X_{v,i}(n)$ = ondas de tensão e corrente amostradas.

A Figura 4.16 mostra a resposta em freqüência de um determinado filtro TDF. Observa-se que ele apresenta uma eficiente rejeição dos componentes harmônicos de alta freqüência.

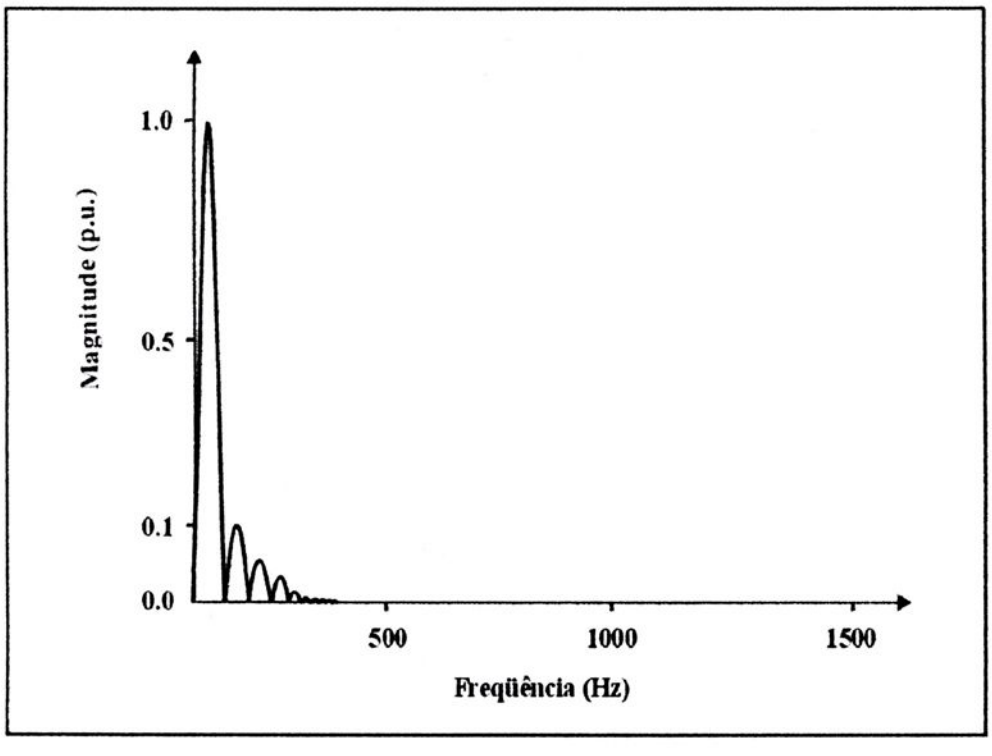


FIGURA 4.16 - Resposta em freqüência de um filtro TDF.

Domingues & Coury (1998) utilizaram no trabalho sobre a localização de faltas em linhas de transmissão com múltiplos terminais, um filtro digital TDF, pois os cálculos para localização da falta foram feitos utilizando-se os fasores fundamentais.

Porém, quando se trabalha com Redes Neurais Artificiais (RNAs) o aprendizado se dá com os padrões fornecidos. Se fornecemos valores amostrados das formas de ondas das tensões e das correntes com componentes de alta ou baixa freqüências, o aprendizado da RNA se dará com estes padrões. O fundamental é a escolha adequada dos padrões de treinamento. A chave para o sucesso do aprendizado

unesp

está aí. Uma das grandes vantagens das RNAs é não haver necessidade de se efetuar cálculos com expressões matemáticas das linhas aéreas dos sistemas de energia elétrica, porém deve ficar ressaltado que a modelagem matemática dos sistemas elétricos jamais perderá seu valor e continuará sempre contribuindo para o desenvolvimento da engenharia.

As RNAs neste sentido é uma poderosa ferramenta, porém muitas vezes não resolve um problema que as equações matemáticas tradicionais resolvem perfeitamente.

unesp

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

São apresentados neste capítulo os procedimentos para a formação do conjunto de treinamento da Rede Neural Artificial (RNA), as funções de ativação utilizadas, a arquitetura utilizada, os conjuntos de teste da RNA e os resultados obtidos.

A cada simulação realizada no *software Alternative Transiente Program* (ATP) foram gerados sinais trifásicos (*A, B e C*) de tensões e correntes no barramento *P* e sinais trifásicos (*A, B e C*) de tensões nos barramentos *Q* e *R*.

As estapas utilizadas, desde a simulação dos resultados até a avaliação de desempenho da RNA, podem ser vistas no fluxograma apresentado na Figura 5.1.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

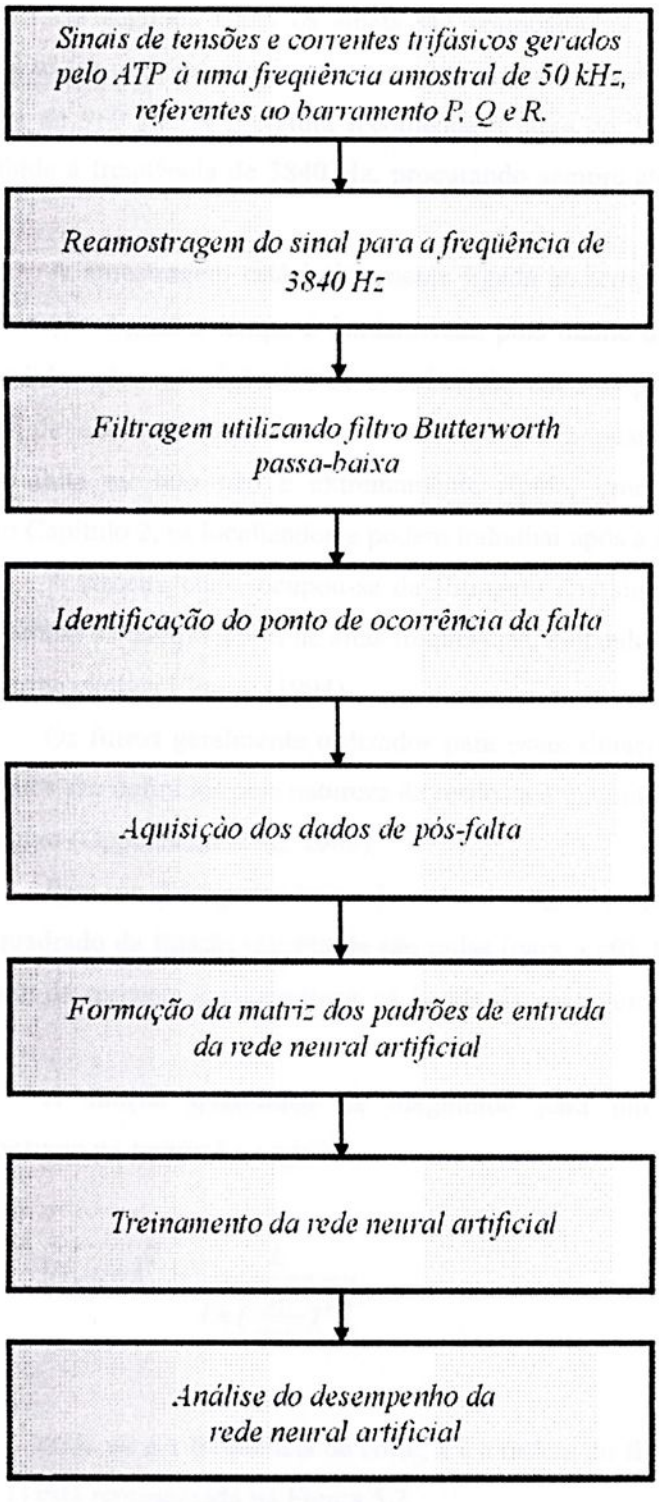


FIGURA 5.1 - Fluxograma das etapas desde as simulações até a avaliação do desempenho da RNA.

Na primeira etapa realizam-se as simulações, obtendo-se do ATP os sinais trifásicos de tensões e correntes a uma freqüência amostral de 50 kHz.

Na segunda etapa os sinais são reamostrados a uma freqüência de 3840 Hz. Para se ter uma referência, as proteções digitais trabalham geralmente com uma freqüência de 960 Hz. A literatura recomenda a faixa de 240 a 1920 Hz. Desta forma é escolhida a freqüência de 3840 Hz, procurando sempre atender o teorema da amostragem.

A amostragem está intimamente ligada ao tempo de processamento. No caso da proteção digital o tempo é fundamental, pois diante de um curto-circuito, desde que atendida todas as exigências de coordenação entre as proteções, esta deverá enviar o sinal de abertura (*trip*) com a máxima rapidez possível. Para a função localização de falta tal fato não é extremamente rígido, uma vez que, como já mencionado no Capítulo 2, os localizadores podem trabalhar após a falta (*off-line*).

A terceira etapa ocupou-se da filtragem dos sinais. Os filtros têm a finalidade de atenuar as componentes de altas freqüências, evitando-se com isso o efeito *aliasing* , conforme explica Elmore (1994).

Os filtros geralmente utilizados para estas situações são os da classe Butterworth. Estes são definidos pela natureza da resposta à magnitude ser horizontal na banda de passagem (Oppenheim et al., 1989).

Para um filtro passa-baixa de ordem n, significa que as $2n$-1 primeiras derivadas do quadrado da função magnitude são nulas (para w=0). Outra propriedade é que a magnitude da resposta é monotônica na banda de passagem e de atenuação (ou rejeição).

A função quadrática da magnitude para um filtro passa-baixa Butterworth contínuo no tempo é a seguinte:

$$|H_c(jw)|^2 = \frac{k}{1+(\frac{jw}{jwc})^{2n}} \tag{5.1}$$

onde wc é a freqüência de corte, n é a ordem do filtro e k é o ganho do filtro. A eq. (5.1) está representada na Figura 5.2.

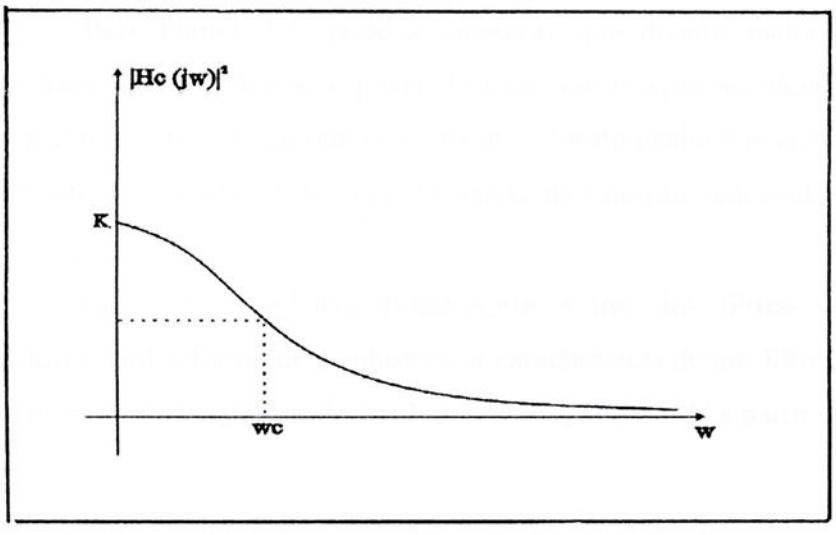


FIGURA 5.2 – Quadrado da magnitude para o filtro Butterworth contínuo no tempo.

Conforme o parâmetro *n* da eq. (5.1) aumenta, a característica do filtro varia aproximando-se cada vez mais do ideal. Ele permanece próximo a unidade um pouco acima da banda de passagem e decai bruscamente próximo de zero na banda de atenuação, reduzindo a banda de transição, embora a função quadrática da magnitude para a freqüência de corte (wc) será sempre igual a meio (1/2) em razão da eq. (5.1) (Oppenheim et al., 1989).

A Figura 5.3. mostra as respostas da amplitude do filtro Butterworth para diferentes ordens *n*, onde *k* é igual a 1 e *wc* é igual a 1 rad/seg.

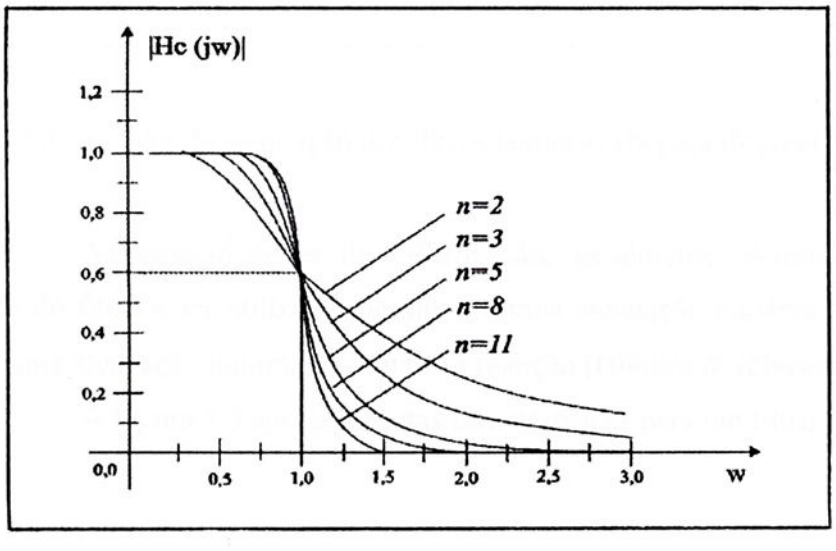


FIGURA 5.3 - Curvas das respostas da amplitude do filtro Butterworth para diferentes ordens.

Pela Figura 5.3, pode-se observar que quanto maior o valor do parâmetro *n*, mais próxima fica a resposta do filtro em relação ao ideal, ou seja, na banda de passagem a curva se mantém próxima do valor do ganho *k* enquanto que decai mais bruscamente para próximo de zero na banda de rejeição reduzindo a banda de transição.

O filtro passa-baixa Butterworth é um dos filtros que mais se aproxima do ideal. Outra forma de se observar a característica de um filtro Butterworth é através da curva de atenuação, conforme Figura 5.4, que é obtida a partir da eq. (5.2)

$$A(w) = 10 \times log(|H(jw)|^2) = 10 \times log\left[1 + (\frac{w}{wc})^2\right]_{dB} \qquad (5.2)$$

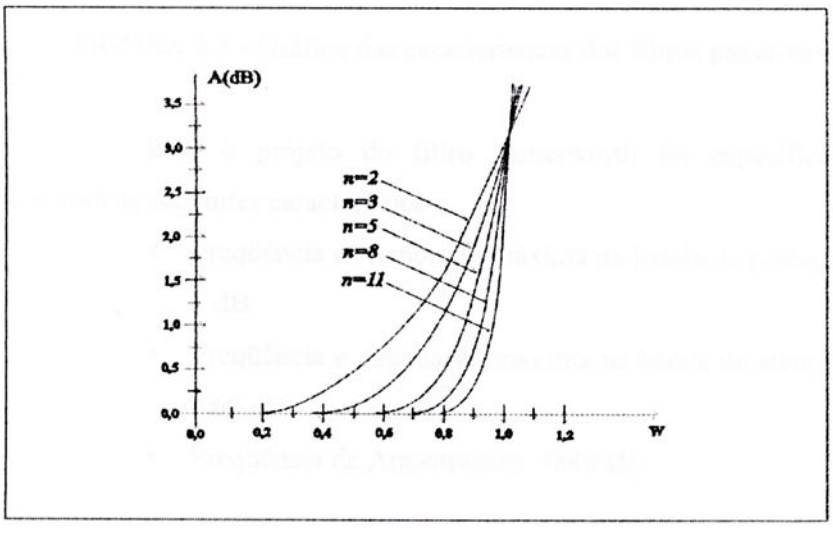
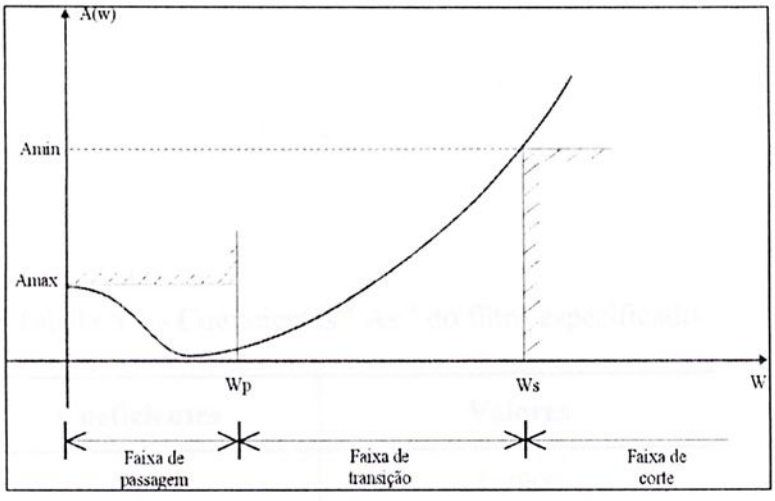


FIGURA 5.4 - Curvas de atenuação dos filtros Butterworth para diferentes ordens.

As especificações dos filtros são, geralmente, determinadas pela característica do filtro a ser utilizado, permitindo uma atenuação máxima na banda de passagem e uma atenuação mínima na banda de rejeição (Hilburn & Johnson,1983).

A Figura 5.5 apresenta estas características para um filtro passa-baixa.



$$\boxed{\begin{array}{l} 0 \le w \le wp \Rightarrow A \le Amax \\ w \ge ws \Rightarrow A \ge Amin \end{array}}$$

FIGURA 5.5 - Gráfico das características dos filtros passa-baixa.

Para o projeto do filtro Butterworth foi especificado um filtro analógico com as seguintes características:

- Freqüência e Atenuação máxima na banda de passagem : 750 Hz e 1 dB.
- Freqüência e Atenuação máxima na banda de atenuação: 1100 Hz e 60 dB.
- Freqüência de Amostragem: 3840 Hz

A partir destas especificações, obteve-se o filtro:

- Ordem do filtro: 14
- Freqüência de corte: 920 Hz
- Coeficientes dos polinômios A e B, que são utilizados na equação de diferenças, que já está implementada na função *filter* do *software* Matlab (Matlab, 1998).

As Tabelas 5.1 e 5.2 a título de ilustração apresenta os valores dos coeficientes dos polinômios.

Tabela 5.1 - Coeficientes ' As ' do filtro especificado

Coeficientes	Valores
A0	1.0000
A1	-2.3069
A2	4.2599
A3	-5.0450
A4	4.8801
A5	-3.5983
A6	2.1843
A7	-1.0521
A8	0.4127
A9	-0.1276
A10	0.0310
A11	-0.0056
A12	0.0007
A13	-0.0001
A14	0.0000

unesp

Tabela 5.2 - Coeficientes ' Bs 'do filtro especificiado

Coeficientes	Valores
B0	0.0000
B1	0.0005
B2	0.0035
B3	0.0141
B4	0.0387
B5	0.0774
B6	0.1160
B7	0.1326
B8	0.1160
B9	0.0774
B10	0.0387
B11	0.0141
B12	0.0035
B13	0.0005
B14	0.0000

A Figura 5.6 apresenta o gráfico da resposta em freqüência do filtro especificado, obtido através do *software Matlab*



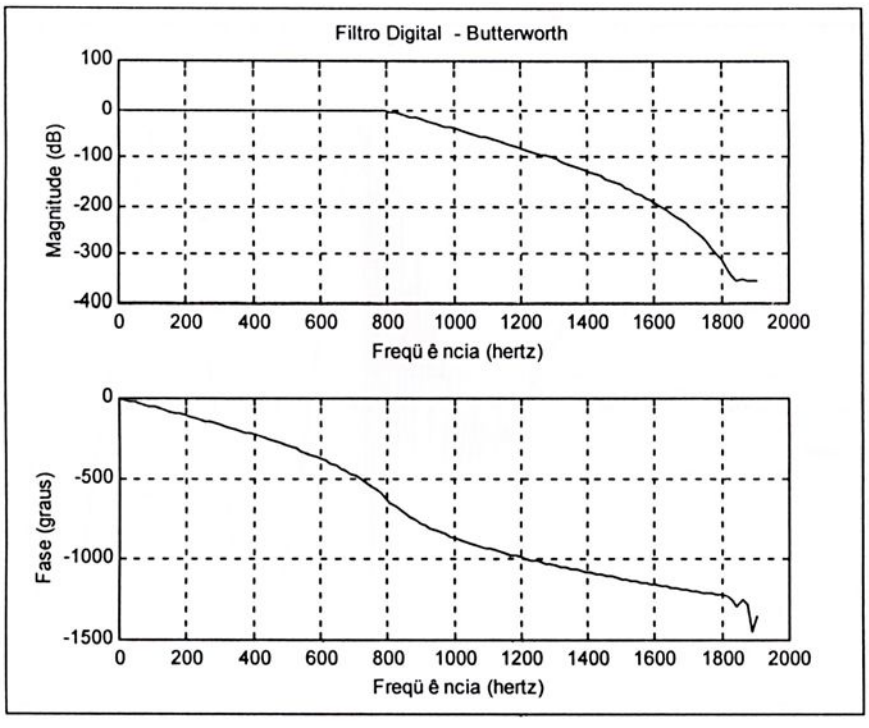


FIGURA 5.6. - Gráfico das curvas de resposta em freqüência e ângulo de fase do filtro Butterworth utilizado.

A Figura 5.7 apresenta o sinal de tensão medido na barra *Q* devido a uma falta fase-terra ocorrido a 13 km da barra *P*. Este sinal ainda não foi filtrado.

A Figura 5.8 apresenta o mesmo sinal de tensão, porém, já filtrado.

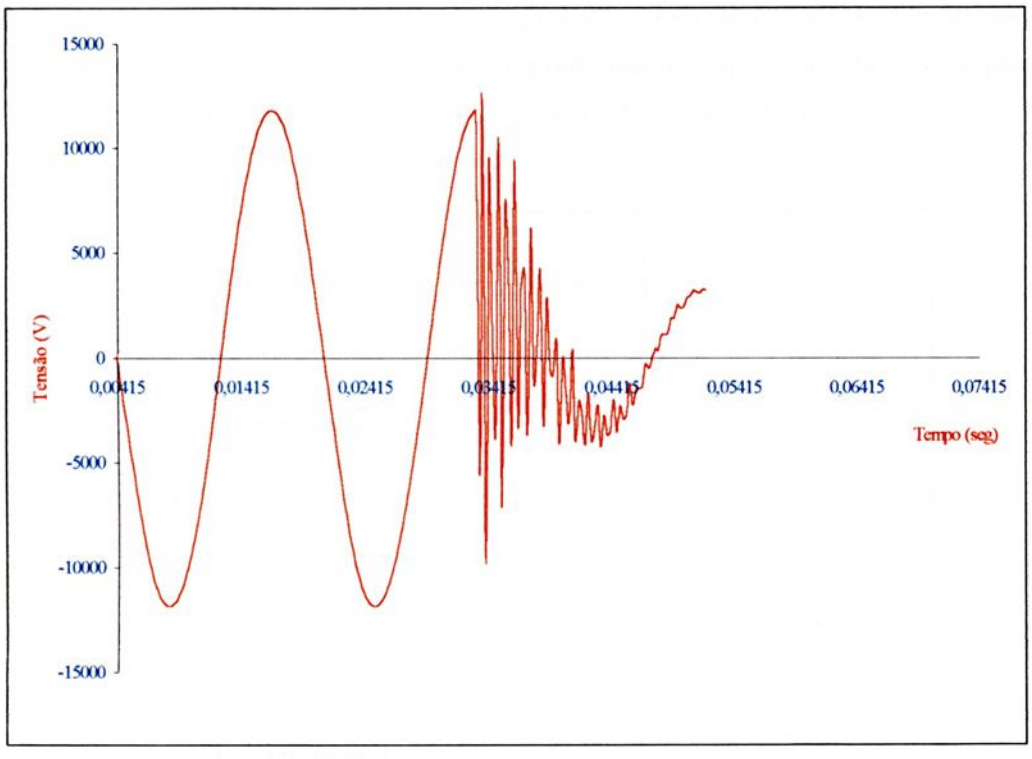


FIGURA 5.7. - Forma de onda da tensão da fase *A*, medida na barra *Q* devido um curto-circuito da mesma fase para terra no trecho *P*.

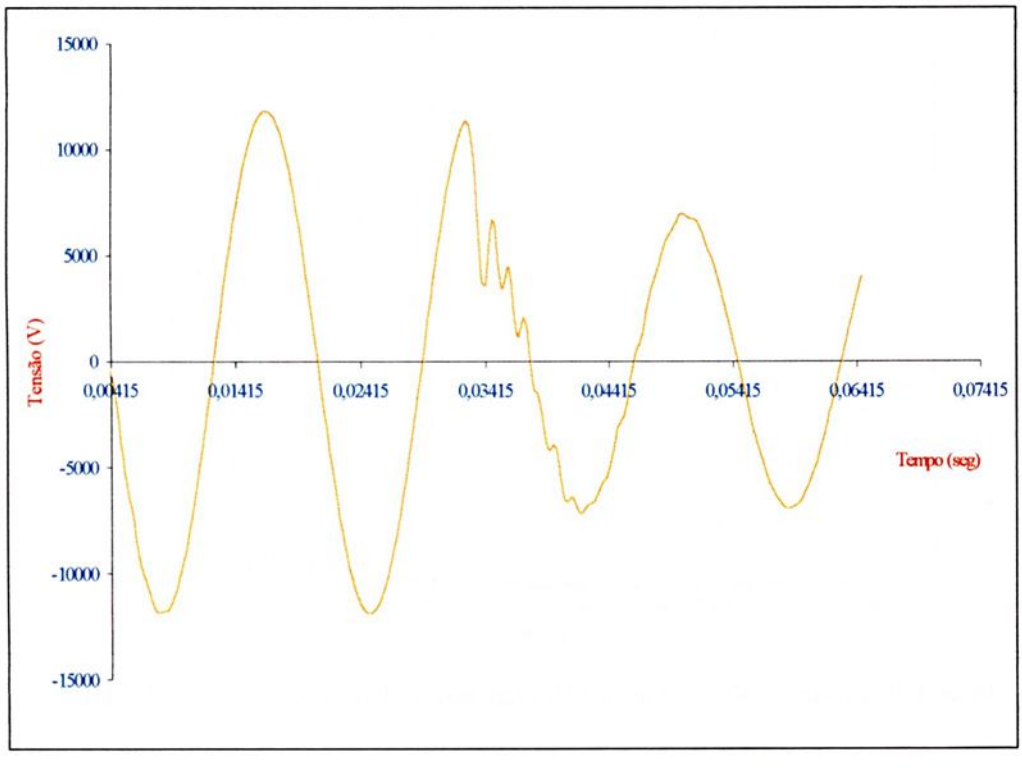


FIGURA 5.8 - Forma de onda do mesmo sinal da figura anterior, filtrada pelo filtro Butterworth especificado.

Nas Figuras 5.9 e 5.10, podemos observar os espectros de freqüências dos sinais das Figuras 5.7 e 5.8, respectivamente, após calcular as respectivas Transformadas Rápidas de Fourier (*Fast Fourier Transform (FFT)*).

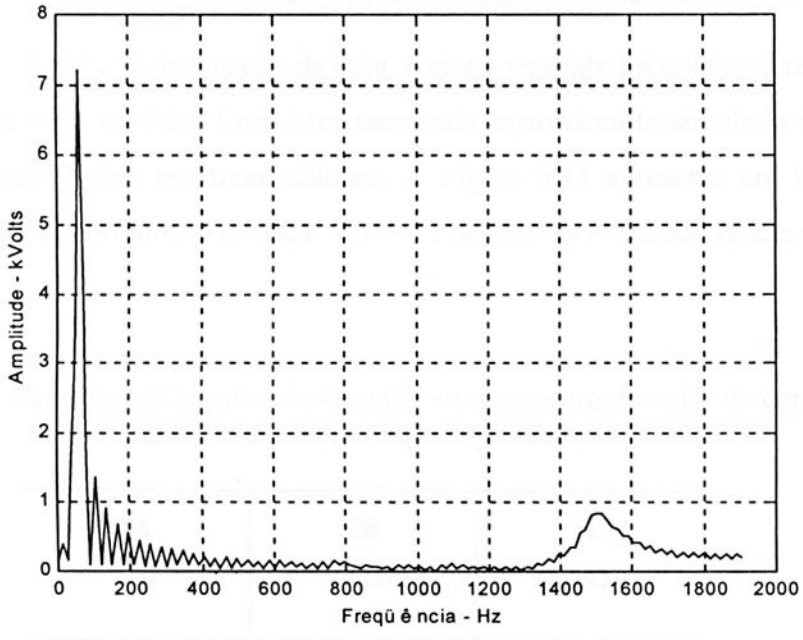


FIGURA 5.9 - Espectro de freqüência da forma de onda mostrada na Figura 5.7.

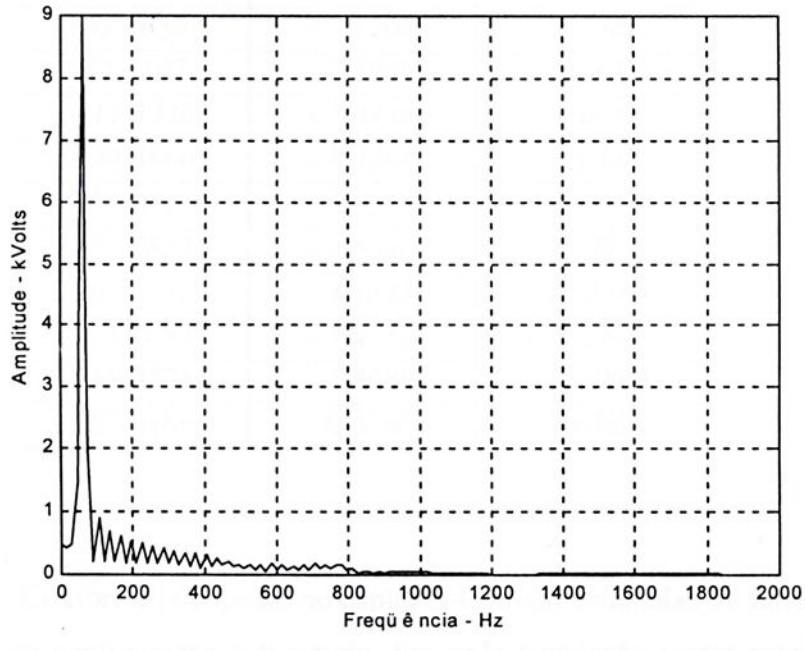


FIGURA 5.10 - Espectro de freqüência da forma de onda mostrada na Figura 5.8.

No Capítulo 4, seção secundária 4.4, que trata da metodologia utilizada, foi apresentado o critério utilizado para identificar a falta. Naquela seção como nesta, estão indicados arquivos de faltas, destacando-se em cada um a região de transição entre pré e pós-falta, para situações diferentes, conforme Tabelas 4.3 e 5.3.

Após a identificação da falta, a etapa seguinte foi coletar sete amostras pós-falta de cada sinal medido. Com isto, para cada curto-circuito simulado formou-se uma matriz de sete linhas per treze colunas. A Figura 5.11 apresenta um trecho das colunas referentes as correntes das fases *A*, *B* e *C*, destacando-se a ocorrência da falta.

TABELA 5.3- Parte de um arquivo destacando-se o aumento do valor da corrente da fase *A* e amostras de pré e pós-falta.

IA **(A)**	**IB** **(A)**	**IC** **(A)**
8.6031	- 8.4555	- 0.0217
9.8965	- 7.9712	- 0.9590
13.4640	- 7.5045	- 2.0242
22.6454	*- 7.1869*	*- 3.2908*
41.6638	*- 7.1208*	*- 4.8462*
72.5507	*- 7.1968*	*- 6.5654*
111.5936	*- 7.0440*	*- 8.0617*
149.5860	*- 6.3568*	*- 9.0141*
177.6815	*- 5.3350*	*- 9.6065*
193.9855	*- 4.5496*	*- 10.3945*
203.6232	*- 4.1541*	*- 11.5165*
211.9631	*- 3.4751*	*- 12.2846*
218.9775	- 1.8080	- 11.9804
221.0180	0.4560	- 10.9822

Conforme já exposto no capítulo 4, foram simuladas 36 faltas nos três ramos (trechos) da configuração sob estudo. Em cada simulação foram coletadas oito amostras, formando um total de 288 amostras. A matriz de padrões para treinamento da RNA ficou assim constituída: 288 linhas per 12 colunas.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Com o *toolbox Neural Network* do *software* Matlab, realizou-se o treinamento da RNA. Os parâmetros básicos de treinamento utilizados foram:

- Algoritmo: **Levenberg-Marquadt**.
- Funções de ativação:

  1ª. camada - **tangente sigmóide**

  2ª. camada - **tangente sigmóide**

  3ª. camada - **rampa simétrica**.
- Camada de entrada: **12 entradas**.
- Camada de saída: **3 saídas**.
- Primeira camada escondida: **10 neurônios**.
- Segunda camada escondida: **5 neurônios**.
- Critério de parada por erro: $\mathbf{1.0*10^{-7}}$.
- Critério de parada por épocas: **2000**.

O número de época significa a quantidade de vezes que todo o conjunto de treinamento deve ser apresentado à rede neural para que a mesma consiga mapear adequadamente o relacionamento entre as entradas e saídas.

A Figura 5.11 apresenta o gráfico de desempenho da RNA durante o treinamento.

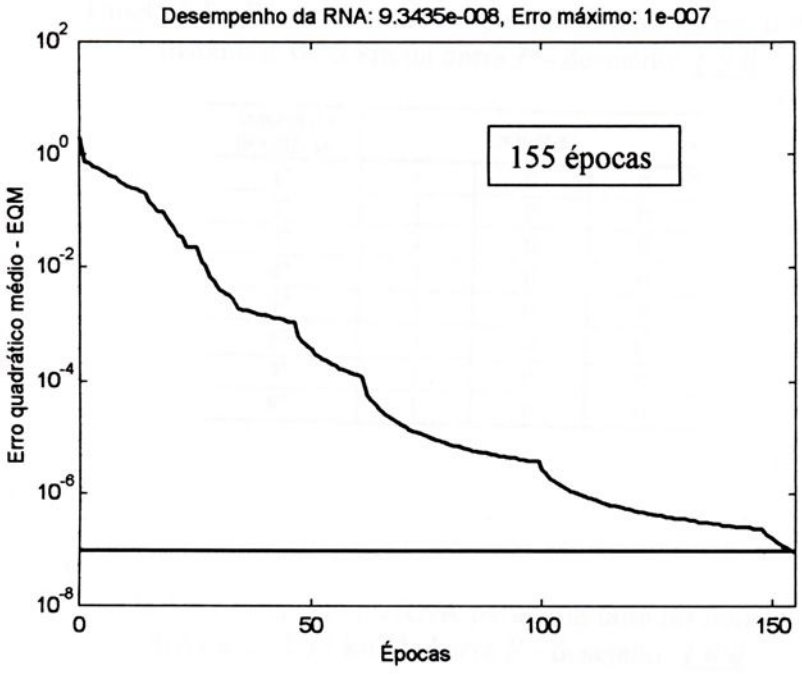


FIGURA 5.11 - Gráfico do desenvolvimento da RNA durante o treinamento.

Nesta e última etapa realizou-se a avaliação de performance da RNA, após o seu treinamento. Foram apresentados para a RNA 18 simulações de defeitos, diferentes daqueles utilizados no período de treinamento. As respostas da RNA estão mostradas nas Tabelas 5.4 a 5.21.

O resultado esperado, é codificado da seguinte forma:

- Falta no trecho P - T: **1 0 0**
- Falta no trecho T - Q: **0 1 0**
- Falta no trecho T - R: **0 0 1**

Tabela 5.4 - Resposta da RNA para uma falta no ramo P-T
distância: 0.35 km da barra P - desejado: ***1 0 0***

AMOSTRA DO SINAL	RESULTADO DA RNA		
1ª.	1	0	0
2ª.	1	0	0
3ª.	1	0	0
4ª.	1	0	0
5ª.	1	0	0
6ª.	1	0	0
7ª.	1	0	0
8ª.	1	0	0

Tabela 5.5 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T*
distância: 0.56 km da barra *P* - desejado: ***1 0 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	1	0	0
2ª.	1	0	0
3ª.	1	0	0
4ª.	1	0	0
5ª.	1	0	0
6ª.	1	0	0
7ª.	1	0	0
8ª.	1	0	0

Tabela 5.6 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T*
distância: 2.33 km da barra *P* - desejado: ***1 0 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	1	0	0
2ª.	1	0	0
3ª.	1	0	0
4ª.	1	0	0
5ª.	1	0	0
6ª.	1	0	0
7ª.	1	0	0
8ª.	1	0	0

Tabela 5.7 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T*
distância: 7.0 km da barra *P* - desejado: ***1 0 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	1	0	0
2ª.	1	0	0
3ª.	1	0	0
4ª.	1	0	0
5ª.	1	0	0
6ª.	1	0	0
7ª.	1	0	0
8ª.	1	0	0

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Tabela 5.8 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T*
distância: 13.50 km da barra *P* - desejado: ***1 0 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0	0	1
2ª.	1	0	0
3ª.	1	0	0
4ª.	1	0	0
5ª.	1	0	0
6ª.	1	0	0
7ª.	1	0	0
8ª.	1	0	0

Tabela 5.9 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T*
distância: 15.80 km da barra *P* - desejado: ***1 0 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	1	0	0
2ª.	1	0	0
3ª.	1	0	0
4ª.	1	0	0
5ª.	1	0	0
6ª.	1	0	0
7ª.	1	0	0
8ª.	1	0	0

As Tabelas de 5.4 a 5.9, apresentam as respostas da RNA, quando submetida aos curtos-circuitos no trecho *P-T*. Apesar da Tabela 5.8 apresentar uma amostra errada, considera-se que a RNA respondeu corretamente, indicando que todos os curtos-circuitos ocorreram no trecho de linha *P-T*, conforme pode ser observado pelo código de resposta - **1 0 0**.

Tabela 5.10 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q*
distância: 0.85 km da barra *T* - desejado: ***0 1 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0	1	0
2ª.	0	1	0
3ª.	0	1	0
4ª.	0	1	0
5ª.	0	1	0
6a.	1	0	0
7ª.	0	1	0
8ª.	0	1	0

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Tabela 5.11 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q*
distância: 3.5 km da barra *T* - desejado: ***0 1 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0	0	1
2ª.	0	1	0
3ª.	0	1	0
4ª.	0	1	0
5ª.	0	1	0
6ª.	0	1	0
7ª.	0	1	0
8ª.	0	1	0

Tabela 5.12 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q*
distância: 8.0 km da barra *T* - desejado: ***0 1 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0	1	0
2ª.	0	1	0
3ª.	0	1	0
4ª.	0	1	0
5ª.	0	1	0
6ª.	0	1	0
7ª.	0	1	0
8ª.	0	1	0

Tabela 5.13 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q*
distância: 16.45 km da barra *T* - desejado: ***0 1 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0	0	1
2ª.	0	0	1
3ª.	0	1	0
4ª.	0	1	0
5ª.	0	1	0
6ª.	0	1	0
7ª.	0	1	0
8ª.	0	1	0

Tabela 5.14 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q*
distância: 22.50 km da barra *T* - desejado: ***0 1 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0	1	0
2ª.	0	1	0
3ª.	0	1	0
4ª.	0	1	0
5ª.	0	1	0
6ª.	0	1	0
7ª.	0	1	0
8ª.	0	1	0

Tabela 5.15 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q*
distância: 23.80 km da barra *T* - desejado: ***0 1 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0	1	0
2ª.	0	1	0
3ª.	0	1	0
4ª.	0	1	0
5ª.	0	1	0
6ª.	0	1	0
7ª.	0	1	0
8ª.	0	1	0

As Tabelas de 5.10 a 5.15, apresentam as respostas da RNA, quando submetida aos curtos-circuitos no trecho *T-Q*. Em duas situações a RNA errou em uma amostra, enquanto numa outra errou em duas amostras. Estes erros não tira o mérito de considerar que a RNA respondeu corretamente, indicando que todos os curtos-circuitos ocorreram no trecho de linha *T-Q*, conforme pode ser observado pelo código de resposta **0 1 0**.

Tabela 5.16 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R*
distância: 0.74 km da barra *T* - desejado: ***0 0 1***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	1	0	0
2ª.	1	0	0
3ª.	0	0	1
4ª.	0	1	0
5ª.	1	0	0
6ª.	0	0	1
7ª.	0	0	1
8ª.	0	0	1

Tabela 5.17 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R*
distância: 4.7 km da barra *T* - desejado: ***0 0 1***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0	0	1
2ª.	0	0	1
3ª.	0	0	1
4ª.	0	0	1
5ª.	0	0	1
6ª.	0	0	1
7ª.	0	0	1
8ª.	0	0	1

Tabela 5.18 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R*
distância: 7.0 km da barra *T* - desejado: ***0 0 1***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0	0	1
2ª.	0	0	1
3ª.	0	0	1
4ª.	1	0	0
5ª.	0	0	1
6ª.	0	0	1
7ª.	0	0	1
8ª.	0	0	1

Tabela 5.19 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R*
distância: 8.2 km da barra *T* - desejado: ***0 0 1***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0	0	1
2ª.	0	0	1
3ª.	0	0	1
4ª.	1	0	0
5ª.	0	1	0
6ª.	0	0	1
7ª.	**0**	**1**	**0**
8ª.	0	0	1

Tabela 5.20 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R*
distância: 10.0 km da barra *T* - desejado: ***0 0 1***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0	0	1
2ª.	0	0	1
3ª.	0	0	1
4ª.	0	0	1
5ª.	0	0	1
6ª.	0	0	1
7ª.	0	0	1
8ª.	0	0	1

Tabela 5.21- Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R*
distância: 11.60 km da barra *T* - desejado: ***0 0 1***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0	0	1
2ª.	0	0	1
3ª.	0	0	1
4ª.	0	0	1
5ª.	0	0	1
6ª.	0	0	1
7ª.	0	0	1
8ª.	0	0	1

As Tabelas de 5.16 a 5.21, apresentam as respostas da RNA, quando submetida aos curtos-circuitos no trecho *T-R*. A RNA localizou corretamente o trecho defeituoso em quatro dos seis curtos-circuitos a ela apresentados. Houve erro em uma amostra, conforme Tabela 5.19, e na Tabela 5.16, o erro foi em 50% das amostras.

Apesar disto considera-se que a RNA não deixou de dar a indicação correta do trecho sob defeito, pois efetuando-se uma análise, pode-se perceber que em três amostras os resultados apontam para o trecho *P-T*, uma para o trecho *T-Q* e as demais para o trecho *T-R*, que seria a identificação correta, como pode ser observado pelo código de resposta **0 0 1**. Outro ponto a destacar é que nesta região próxima a barra *T*, no sentido trecho *T-R*, houve uma mudança de cabo. Estes dados servirão para uma análise em futuros estudos, quando de uma ampliação da configuração do SDEE.

A RNA utilizada é classificadora de padrões, portanto os valores apresentados foram submetidos a uma função degrau unitário, deslocada do valor de 0.5

da origem, com o objetivo de adequar-se a codificação indicada no início da apresentação das tabelas. Para elucidar melhor este fato, as Tabelas 5.22, 5.23 e 5.24 apresentam três resultados obtidos diretamente da função de ativação de saída (*purelin*) da RNA. Observa-se que os resultados não estão normalizados pela função degrau unitário, como os anteriores.

Tabela 5.22 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *P-T* sem passar pela função degrau unitário
resposta esperada: ***1 0 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	0.9989	0.0000	0.0011
2ª.	0.9993	0.0000	0.0007
3ª.	1.0001	-0.0000	-0.0000
4ª.	1.0001	0.0003	-0.0003
5ª.	1.0001	-0.0001	0.0000
6ª	0.9998	-0.0000	0.0002
7ª.	0.9998	-0.0000	-0.0001
8ª.	1.0001	0.0001	-0.0001

Tabela 5.23 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-Q* sem passar pela função degrau unitário
resposta esperada: ***0 1 0***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	-0.0001	0.0024	0.9977
2ª.	0.0000	0.9444	0.0556
3ª.	0.0000	0.9999	0.0001
4ª.	0.0000	0.9958	0.0042
5ª.	0.0001	2.0900	-1.0900
6ª	0.0000	0.9999	0.0001
7ª.	-0.0000	1.0014	-0.0014
8ª.	0.0000	1.3243	-0.3243

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Tabela 5.24 - Resposta da RNA para uma falta no ramo *T-R*
sem passar pela função degrau unitário
resposta esperada: ***0 0 1***

AMOSTRA DO SINAL	CÓDIGO		
1ª.	-0.0001	-0.0000	1.0001
2ª.	-0.0001	-0.0000	1.0001
3ª.	-0.0001	-0.0000	1.0001
4ª.	-0.0001	-0.0000	1.0001
5ª.	-0.0001	-0.0000	1.0001
6ª	-0.0001	0.0001	1.0000
7ª.	0.0000	-0.9963	0.0037
8ª.	-0.0000	-0.0000	1.0001

Baseado nos resultados apresentados pode-se considerar que a RNA identificou corretamente os trechos em falta, representado um percentual de 97%. As informações dadas por um dispositivo deste instalado, permitiria a uma equipe de manutenção saber em qual ramal ocorreu o defeito, agindo com maior rapidez para o restabelecimento do fornecimento de energia

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Este trabalho utilizou uma configuração de tamanho modesto com dados reais de uma linha de distribuição de energia elétrica. Apesar disto, a metodologia aplicada, o *software* utilizado para as simulações - *Alternative Transient Program* (ATP) e os demais recursos utilizados possibilitam o uso de configurações maiores, tanto em extensão como em número de ramais. O processamento nestes casos exigirá um tempo maior, devido a necessidade de uma arquitetura de Rede Neural Artificial (RNA) com maior número de elementos processadores (neurônios) nas camadas escondidas e na camada de saída.

O *software* Matlab utilizado para simulação do filtro, treinamento da RNA e nos programas auxiliares para obtenção dos sinais, é extremamente versátil. O inconveniente que pode surgir, dependendo do *hardware* utilizado e da dimensão da matriz dos padrões, é o tempo de treinamento tornar-se demasiadamente longo, podendo chegar em certos casos a 20, 30 ou mais horas de processamento. Deve-se ficar claro que isto de nenhuma forma tira o valor do método das Redes Neurais Artificiais (RNAs), pois mesmo assim, o treinamento é feito somente uma vez.

Uma arquitetura de RNA destinada a um determinado processo pode ser utilizada por um período de alguns meses ou até anos e necessitar de três ou quatro dias para o treinamento, o qual se dará novamente quando houver alguma mudança no

domínio do aprendizado, de tal forma que a RNA não possa mais generalizar os resultados.

Apesar do treinamento único, o estudo impõe um exaustivo esforço computacional para formar os arquivos exigidos à simulação dos curtos-circuitos, bem como para a pesquisa da arquitetura da RNA e o seu treinamento.

A metodologia admite qualquer tipo de falta, valor de impedância de falta e ângulo de incidência de falta. Optou-se neste trabalho por realizar simulações de faltas tipo fase-terra com valor da resistência de falta de cinco ohms e ângulo de incidência de falta de 90 graus, pretendendo-se em trabalhos futuros realizar simulações e análises à outros tipos de faltas, valores de impedância de falta e ângulos de incidência de falta, conforme adiante mencionado.

Esta dissertação envolveu um número significativo de assuntos: utilização do *software* de simulação ATP, utilização do *software* Matlab, programas auxiliares para formação de arquivos e obtenção dos dados, relés digitais, processamentos de sinais, filtros, Sistema Elétrico de Potência (SEP) e por fim RNA, trazendo grande benefício ao autor, bem como àqueles que se interessarem pelo assunto.

O Capítulo 5, apresenta os resultados obtidos com os testes de validação da RNA. Foram apresentados 18 pontos de curtos-circuitos, sendo que cada curto-circuito contém oito amostras. Constata-se pelas Tabelas de 5.4 a 5.9, que a RNA respondeu corretamente todos os trechos de curto-circuito solicitados a ela, apesar da resposta da Tabela 5.8 apresentar uma amostra errada. Pelas Tabelas de 5.10 a 5.15, ocorreu algo parecido com o trecho anterior, apesar de ocorrido erro em duas amostras na Tabela 5.13. Finalmente no trecho *T-R*, na Tabela 5.16, a RNA acertou 50% das amostras, apresentando ainda um erro na Tabela 5.19. Não há um valor mínimo estipulado que possa ser considerado como fronteira entre acerto e erro. Vale lembrar que o menor valor de acerto em quantidade de amostras foi de 50% , porém o objetivo do localizador de faltas não é ficar analisando amostras em cada janela de falta e sim uma análise global das amostras em cada falta. Se fosse adotado, por exemplo, uma saída de localização correta, quando dentro de uma janela de amostras, os acertos fossem maiores ou iguais a 50%, esta RNA teria acertado 100% dos trechos.

Aqui iniciou-se uma pesquisa, conforme os objetivos traçados, que a principio parecia delimitada, porém com o desenvolvimento e obtenção de resultados, percebeu-se outros enfoques que podem ser considerados e estendidos em direções diferentes. Numa eventual mudança ou ampliação da pesquisa há que se considerar a

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

necessidade de um número maior de programas externos para otimizar a formação dos arquivos de simulação e conseqüente obtenção de resultados.

Este trabalho disseminou outras idéias que poderão ser desenvolvidas. Entre elas pode-se citar:

a) Gerar os padrões de treinamento e trabalhar no domínio da freqüência;

b) Localizar a distância do ponto de defeito, relativo à subestação;

c) Ampliar a configuração do sistema;

d) Implementar o localizador de defeitos;

e) Comparação com outros tipos de arquiteturas.

O método apresenta uma pequena desvantagem, conforme já mencionado, que é o exaustivo esforço computacional. Para configurações bem maiores, haverá então a necessidade da elaboração de um programa, por exemplo em linguagem C, pois o tempo gasto pelo software Matlab no treinamento da RNA seria demasiadamente longo, já que é um programa interpretador.

Um resultado positivo desta dissertação foi a sua apresentação parcial na IV Conferência de Aplicações Industriais - INDUSCON 2000 (Goes, 2000), e ainda a aceitação pelo XVI SNPTEE, programado para o mês de outubro de 2001, na cidade de Campinas, SP.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, R. K.; JOHNS, A. T.; SONG, Y. H.; DUNN, R. W.; FITTON, D. S. Neural-network based adaptive single-pole autoreclosure technique for EHV transmission systems. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., v. 141, n. 2, p.155-160, Mar. 1994.

ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM - Rule Book. Leuven EMTP Center (LEC), 1987.

AMON FILHO, J.; PEREIRA, M. P. Curso básico sobre a utilização do ATP. CLAUE - Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, nov. 1996.

BATTITI, R. First and second order method for learning: between steepest descent and Newton's method. Neural Computation, v. 4, n. 2, p. 141-166, 1992.

BERNIERI, A.; D'APUZZO, M. A. neural network approach for identification and fault diagnosis on dynamic systems. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 43, n. 6, p. 867-873, Dec. 1994.

BRETAS, A.S. Esquema de proteção direcional para linhas de transmissão de alta tensão utilizando redes neurais artificiais. 1998. 98 f. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos

BURRUS, C.S.; PARKS, T.W. DFT/FFT and convolution algorithms - Theory and implementation. Wiley Interscience. (1985).

CAMINHA, A. C. Introdução à proteção dos sistemas elétricos. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 211 p., 22 cm.

CHOWDHURY, B. H.; WANG, K. Fault classification in power systems using artificial neural networks. Engineering Intelligent System. CRL Publishing Ltd, v. 4, n. 2, p. 101-112, June 1996.

DALSTEIN, T.; KULICKE, B. Neural network approach to fault classifacation for high speed protective relaying. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 2, p. 1002-1009, Apr. 1995.

DOMINGUES, E. T. Localizador digital de faltas para linhas de transmissão de múltiplos terminais. 1998. 93 f. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

DOMMEL, H. W.; MEYER, W. S. Computation of electromagnetic transients. Proceedings of the IEEE, v. 62, n.7, p.983-993, July 1974.

EBRON, S.; LUKEMAN, D. L.; WHITE, M. A. neural network approach to the detection of incipient faults on power distribuition feeders. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 2, p. 905-914, Apr. 1990.

ELGERD, O. I. Energia Elétrica - Introdução a teoria de sistemas de energia elétrica. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 604 p., 22 cm. Tradução: Ademaro A. M. B. Cotrim, Escola de Engenharia de Mauá, São Paulo.

ELMORE, W. A. Protective relaying theory and applications. New York: Marcel Dekker, Inc., 367 p., 28 cm, cap. 6: Microprocessor Relaying Fundamentals, p. 85-92, 1994.

ERIKSSON, L.; SAHA, M. M.; ROCKEFELLER, G. D. An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-104, n.2, p. 424-436, Feb. 1985.

FORESSE, F. D.; HAGAN, M. T. Gauss-Newton approximation to neural networks. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 1997, p. 1930-1935.

GHOSH, A. K.; LUBKEMAN, D. L. The classification of power system disturbance waveforms using a neural network approach. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 1, p. 109-115, Jan. 1995.

GIOVANINI, R. Introdução às Redes Neurais. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica, São Carlos, 1998.

GOES, E.A. A new approach based on neural network for the identification of branches under short-circuit in distribuition lines. In: IV Conferência de Aplicações Industriais Induscon 2000, 2000, Porto Alegre. Anais do Induscon'00 Porto Alegre, 2000. p.740-745.

HAGAN, M. T.; MOHAMMAD, B. M. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. IEEE Transaction on Neural Networks, v. 5, n. 6, p. 989-993, .Nov. 1994.

HAYKIN, S. Neural networks - A comprehensive foudation. Englewood Cliffs: Macmillan, 1994.

HAYKIN, S.; LEUNG, H. Blind equalization formulated as a self organized learning process. In :ASILOMAR CONFERENCE ON SIGNALS, SYSTEMS, AND COMPUTERS, 26, Pacific Glove, 1992, p.346-350.

HECHT-NIELSEN, R. Neurocomputing. Massachusetts: Addison Wesley, 1990.

HILBURN, J. L.; JOHNSON, D. E. Manual of active filter design. Mcgraw Hill Book Company, 1983.

HSU, Y.-Y.; HUANG, H.-M. Distribution system service restoration using the artificial neural network approach and pattern recognition method. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., v. 142, p. 251-256, n. 2, May 1995.

HUSH, D. R.; HORNE, B. G. Progress in supervised neural networks. IEEE Signal Processing Magazine, p. 8-39, Jan. 1993.

KINDERMANN, G. Curto circuito. Porto Alegre: Sagra-Dcluzzato, Livreiros, Editores e Distribuidores Ltda., 1992. 211 p., 21 cm.

KOHONEN, T. Learning vector quantization for pattern recognition. Furland: Helsinki University of Technology, 1986 (Technical Report TKK - F-A601).

KOVÁCS, Z. L., Redes neurais artificiais: fundamentos e aplicações. São Paulo: Edição Acadêmica , 1996, 163 p, 21 cm.

MASON, C. R. The art and science of protective relaying. New York: John Wiley & Sons, Inc., New York, 1956. 410 p., 22 cm.

MATLAB - *The Language of Technical Computing*, Version 5.2.3084, January 17,1998.

MOORE, P. J.; ÖHLÉN, C.; AGGARWAL, R. K. Power system protection, 1. ed. London, United Kingdom: Ed. The Electricity Training Association, 1995, cap. 4, p. 58-90.

MURUOKA, M.; MITANI, I.; INAGAKI, J. Microprocessor-based fault locator. Toshiba Review, n.48, Summer, p. 11-14, 1984.

NARENDRA, K. S. et al., Identification and control of dynamical systems using neural networks. IEEE Transactions on Neural Networks, v.1, p. 4-27, 1990.

NEGRISOLI, M.E.M., CURI, A.M., Apostila do curso de especialização em Subestações - Núcleo Tecnologia Ltda, Itajubá - MG.

OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V. Arquitetura de redes neurais multicamadas para simulação de relés de distância. In: CONGRESSO ÍBERO LATINO-AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA, 18.,1997, Brasília, Anais v. 3, p. 1457-1464.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. Discrete-time signal processing. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 877 p., 21 cm, 1989.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. Computer relaying for power systems. Taunton,Somerset, Englad: Research Studies Press Ltda. New York: John Wiley & Sons Inc., 1988, 289 p., 21 cm

PHELPS DODGE: ALCOA - Fios e cabos elétricos S.A. Dados técnicos de cabos nus de alumínio e alumínio liga.

PIHLER, J.; GRCAR, B.; DOLINAR, D. Improved operation of power transformer protection using artificial neural network. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, n. 3, p. 1128-1136, July 1997.

REVISTA ELETRICIDADE MODERNA. Idéias & Tecnologia: Localização de faltas em redes de distribuição. Mensal. n. 66, abr. 1999.

RUMELHART, D.E.; HINTON, G.E.; WILLIAN, R.J. Parallel Distributed Processing. Massachutts: MIT Press, 1986.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

SAHA, M.M.; ERIKSSON, L. Microcomputer-based accurate fault locator with remote-end infeed compensation. IEE Conference Publication, n. 249, p. 193-198, Apr. 1985.

SENGER, E. C. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 3., 1998, São Paulo. Anais. Escola Politécnica da USP: - Seção Técnica 15, p. 720-724.

SIDHU, T. S.; SINGH, H.; SACHDEV, M. S. Design, implementation and testing of an artificial neural network based fault direction discriminator for protecting transmission lines. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 2, p. 697-706, Apr. 1995.

SONJA E.; LUBKEMAN D. L.; WHITE M. A. neural network approach to the detection of incipient faults on power distribuition feeders. IEEE Transactions Power Delivery, v. 5, n. 2, p. 905-914, Apr. 1990.

SOUZA, A. N. Redes neurais artificiais aplicadas a estudos de subestações de alta tensão abrigadas frente a ensaio de impulsos atmosféricos.1999. 144 f., Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SPANDRI, R. Revista Controle & Instrumentação, jan 2000, p. 68-73, fev. 2000, p. 40-46 e mar. 2000, 42-47

STEVENSON JR.,W. D. Elementos de análise de sistemas de potência. São Paulo: MacGraw-Hill do Brasil, 1978. 347 p., 22,3 cm. Tradução: Ademaro A. M. B. Cotrim, Escola de Engenharia de Mauá, São Paulo.

TAGLARIANI, G. A.; CHRISTI, J. F.; PAGE, E. W., Optimization using neural networks. IEEE Transactions on Computers, v. 40, n. 12, p. 1347-1358, 1991.

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 Transactions on power apparatus and systems, v. PAS-100, n.3, p. 1316-1322, Mar. 1981.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

TAKAGI, T; YAMAKOSHI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-101, n. 8, p. 2892-2898, Aug. 1982.

TOSHIBA - DIGITAL RELAYS AND CONTROLS. International training course on protective relaying for power generation and transmission systems at CESP under JICA's third country training program. Ilha Solteira, Brasil, 1996.

VAN DER SMAGT, P. P.; KROSE, J. A. A real-time learnig neural robot controller. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK, Finlad, 1991, p. 351-356.

WAIBEL, A. et al., Phoneme recognition using time delay neural networks. IEEE Transactions on Acoustics, ASSP-37, p. 328-339, 1989.

WIDROW, B. et al., Layered neural nets for pattern recognition. IEEE Transaction on Acoustics, v. 36, p. 1109-1117, 1998.

YANG, H.-T.; CHANG, W.-Y., HUANG, C.-L. A new neural networks 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, Jan. 1994

ZAMAN, M. R.; RAHMAN, M. A. Experimental testing of the artificial neural network based protection of power transformes. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 13, n. 2,. p. 510-517, Apr. 1998.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

0810000943