

JONI COSER

**CONTRIBUIÇÕES AOS MÉTODOS PARA
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM ALIMENTADORES
DE DISTRIBUIÇÃO**

**FLORIANÓPOLIS
2006**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONTRIBUIÇÕES AOS MÉTODOS PARA
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM ALIMENTADORES
DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos
para a obtenção do grau de Doutor em engenharia elétrica

JONI COSER

Florianópolis, fevereiro de 2006

CONTRIBUIÇÕES AOS MÉTODOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO

Joni Coser

‘Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Sistemas de Energia Elétrica*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Jacqueline Gisele Rolim, Dr. Eng.
Orientadora

Alexandre Trofino Neto, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Jacqueline Gisele Rolim, Dr. Eng.
Presidente

Denis Vinicius Coury, Ph.D.

Elisete Ternes Pereira, Ph.D.

Mauro Roisenberg, Dr. Eng.

Ildemar Cassana Decker, D.Sc.

Dedicado à minha família, que possibilitou acontecer tudo em minha vida, inclusive este trabalho

AGRADECIMENTOS

Aos parceiros no desenvolvimento do trabalho, professora Jacqueline G. Rolim que orientou a seqüência das atividades da tese desde a própria sugestão inicial do tema, e Daniel T. do Vale, bolsista de iniciação científica que foi responsável por elementos muito importantes do trabalho.

Aos professores Denis V. Coury, relator do trabalho, e Elisete T. Pereira por terem se disponibilizado a revisar o trabalho e vir até Florianópolis duas vezes para participar da sua avaliação.

Ao professor Idelmar C. Decker, por ter sido o incentivador à minha permanência nos estudos acadêmicos de pós-graduação.

Ao professor Mauro Roisenberg pela participação na defesa e sugestões ao trabalho.

A Richard R. Reinert pelo apoio na parte computacional e suporte constante para a utilização dos recursos do laboratório, a qualquer hora.

Ao professor Hans H. Zürn, sempre presente em minhas apresentações, tendo atuado como revisor de artigos de nossa equipe em caráter único de ajuda e amizade que sempre nos serve de exemplo.

Ao Dr. Ratan Das, pesquisador em áreas comuns a este trabalho, que nunca encontrei pessoalmente, mas respondeu a questões importantes no início dos desenvolvimentos.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo suporte financeiro.

Resumo da tese apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica

CONTRIBUIÇÕES AOS MÉTODOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO

Joni Coser

Fevereiro / 2006

Orientadora: Professora Jacqueline G. Rolim, Dr. Eng.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Palavras-chave: Localização de Falhas, Sistemas de Distribuição, Redes Neurais Artificiais, Análise e Modelagem de Alimentadores.

Número de Páginas: 196

RESUMO: Este trabalho traz novas contribuições aos métodos para localização de faltas em alimentadores de distribuição. Características peculiares como a presença de derivações laterais, a não-homogeneidade, e a não-transposição dos alimentadores devem ser levadas em conta na implementação de ferramentas com tal finalidade. Os algoritmos existentes que empregam componentes fundamentais de tensões e correntes como dados de entrada apresentam limitações relacionadas com a eficiência do processo e a precisão dos resultados, principalmente para valores significativos da resistência de falta. Isso motivou o desenvolvimento de três metodologias inovadoras. Os dois primeiros métodos são analíticos e destinados à localização de faltas de baixa impedância, sendo um método direto e outro iterativo. Dessa forma, mais de uma alternativa pode ser testada em um determinado alimentador para localizar esse tipo de falta. O terceiro método emprega redes neurais artificiais para localizar faltas de alta-impedância, onde os métodos tradicionais não são tidos como adequados. Foi desenvolvida uma arquitetura modular de redes neurais que possibilita melhorar a capacidade de generalização das mesmas no problema, reduzir o número de exemplos necessários ao treinamento, e tornar mais adequado o seu emprego em alimentadores com derivações laterais. Um pacote computacional com todas as ferramentas desenvolvidas foi implementado. Os resultados obtidos demonstram a relevância das propostas.

Abstract of thesis presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the
degree of Doctor in Electrical Engineering

IMPROVEMENTS ON FAULT LOCATION METHODS FOR POWER DISTRIBUTION FEEDERS

Joni Coser

February / 2006

Advisor: Professor Jacqueline G. Rolim, Dr. Eng.

Concentration Area: Electric Energy Systems

Keywords: Fault Location, Distribution Systems, Artificial Neural Networks, Feeder Analysis, Feeder Modeling, Voltage and Current Fundamental Frequency Components.

Number of Pages: 196

ABSTRACT: This work presents a new investigation on fault location methods for distribution feeders. Specific characteristics regarding the presence of lateral derivations, non-homogeneity, and non-transposition of the feeders must be taken into account when developing such methods. Existing fundamental frequency based methods exhibit shortcomings regarding efficiency and accuracy, mostly due to the fault resistance increment. This has motivated the development of three new methodologies. The first group includes two methods aimed at determining the location of low-impedance faults. One is a direct method and the second is an iterative approach. Thus, two different approaches are offered to test a particular feeder and locate such faults. The third method is an artificial neural network based approach for high-impedance faults. A modular architecture has been proposed in order to improve the generalization capability, reducing the number of examples for training, and to make the approach suitable for feeders with lateral derivations. A software package was developed including all the implemented routines. Test-results attest the relevance of the proposals.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1 - Considerações Iniciais.....	01
1.2 - Desenvolvimento dos Métodos para Localização de Faltas.....	02
1.3 - Localização de Faltas em Redes Elétricas de Distribuição.....	03
1.4 - Contribuições do Trabalho.....	05
1.5 - Organização da Tese.....	06
2. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	08
2.1 - Considerações Iniciais.....	08
2.2 - Principais Componentes de um Sistema de Distribuição.....	08
2.3 - Alimentadores Radiais.....	10
2.3.1 - Características Elétricas.....	12
2.3.2 - Características de Carregamento.....	13
2.4 - Faltas em Alimentadores de Distribuição.....	15
2.4.1 - Tipos de Falta.....	15
2.4.2 - Resistência de Falta.....	16
2.4.3 - Faltas Permanentes e Faltas Temporárias.....	17
2.5 - Proteção de Alimentadores.....	17
2.6 - Considerações Finais.....	19
3 MÉTODOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO.....	20

3.1 - Considerações Iniciais.....	20
3.2 - Métodos Baseados na Componente Fundamental.....	20
3.2.1 - Método da Componente Reativa da Impedância.....	20
3.2.2 - Métodos Iterativos Baseados na Característica da Impedância de Falta.....	23
3.2.3 - Outros Procedimentos.....	28
3.3 - Métodos que Empregam Informações Contidas nos Transitórios de Falta.....	31
3.3.1 - Ondas Viajantes com Dados de Um Único Terminal.....	33
3.3.2 - Ondas Viajantes com Dados de Dois ou Mais Terminais.....	35
3.3.3 - O Emprego da Transformada <i>Wavelet</i>	36
3.4 - Metodologias que Empregam Redes Neurais.....	39
3.5 - Considerações Finais.....	44
4. PROCEDIMENTOS COMUNS AOS NOVOS MÉTODOS PROPOSTOS.....	45
4.1 - Considerações Iniciais.....	45
4.2 - Modelagem de Alimentadores.....	45
4.2.1 - Relações entre Tensões e Correntes	45
4.2.2 - Alocação de Cargas.....	48
4.3 - Estágios Iniciais do Processo de Localização de Falta.....	49
4.3.1 - Extração da Componente Fundamental.....	49
4.3.2 - Detecção e Identificação de Falta.....	55
4.3.3 - Ordem de Grandeza da Resistência de Falta.....	57
4.4 - Considerações Finais.....	58

5. OS MÉTODOS ANALÍTICOS PROPOSTOS FALTAS DE BAIXA IMPEDÂNCIA	59
5.1 - Considerações Iniciais.....	59
5.2 - Alimentador Equivalente Simplificado Não-Homogêneo.....	59
5.3 - Método 1.....	62
5.3.1 - Justificativa.....	62
5.3.2 - Tensões no Alimentador Equivalente.....	62
5.3.3 - Distância ao Ponto de Falta.....	63
5.4 - Método 2.....	68
5.4.1 - Justificativa.....	68
5.4.2 - Tensões no Alimentador Equivalente.....	68
5.4.3 - Distância ao Ponto de Falta.....	69
5.4.4 - Sumário do Processo Iterativo.....	72
5.5 - Generalização dos Algoritmos Analíticos Propostos.....	75
5.5.1 - Múltiplas Possibilidades para a Localização da Falta.....	75
5.5.2 - Segmento em Falta não-Homogêneo.....	75
5.6 - Considerações Finais.....	76
6. METODOLOGIA BASEADA EM REDES NEURAIIS PARA FALTAS DE ALTA- IMPEDÂNCIA.....	78
6.1 - Considerações Iniciais.....	78
6.2 - Tópicos sobre Redes Neurais.....	78
6.2.1 - O que é Uma Rede Neural.....	79
6.2.2 - Principais Benefícios e Limitações.....	80
6.2.3 - Perpeptrons de Múltiplas Camadas com o Algoritmo de	

Retropropagação de Erro.....	81
6.2.4 - Questões Importantes ao Treinamento e Validação de Uma Rede Neural.....	85
6.2.5 - Redes Neurais em Sistemas Elétricos.....	87
6.3 - Justificativa da Metodologia Baseada em Redes Neurais para Localização de Faltas de Alta-Impedância.....	89
6.4 - Essência da Metodologia - Arquitetura Modular com Redes Neurais.....	89
6.5 - Procedimento para Reduzir o Montante de Redes Neurais Necessárias na Arquitetura Modular.....	93
6.6 - Características das Redes Neurais que Integram a Metodologia.....	94
6.6.1 - Dados de Entrada.....	94
6.6.2 - Valores-alvo e Pontos de Falta nos Conjuntos de Treinamento.....	96
6.7 - Procedimentos Adotados para a Definição de Dados de Treinamento e dos Parâmetros das Redes Neurais.....	97
6.8 - Estimativa do Número de Amostras de Treinamento.....	99
6.9 - Múltiplas Possibilidades para a Localização da Falta na Metodologia Baseada em Redes Neurais.....	100
6.10 - Considerações Finais.....	100
7. IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO COMPUTACIONAL E ELEMENTOS COMPLEMENTARES AOS MÉTODOS PROPOSTOS.....	102
7.1 - Considerações Iniciais.....	102
7.2 - Plataformas de Desenvolvimento e Simulação.....	102
7.2.1 - ATP.....	103

7.2.2 - O Aplicativo GTP_Plot.....	104
7.2.3 - MATLAB.....	104
7.3 - O Primeiro Alimentador-Teste.....	104
7.3.1 - Modelo do Alimentador no ATP/Draw.....	106
7.4 - O Protótipo Computacional.....	107
7.4.1 - Interface Gráfica e Processamento dos Módulos.....	107
7.5 - Demonstrações.....	111
7.5.1 - Faltas de Baixa-Impedância.....	112
7.5.2 - Faltas de Alta-Impedância.....	114
7.5.3 - Diagrama do Alimentador.....	116
7.5.4 - Relatório Complementar.....	116
7.6 - Elementos Complementares aos Métodos Propostos.....	118
7.6.1 - Elementos para Eliminação de Múltiplas Soluções.....	118
7.6.2 - Elementos para Implantação do Sistema “em Campo”.....	123
7.7 - Considerações Finais.....	125
8. RESULTADOS DE TESTES DOS MÓDULOS PARA CÁLCULO DA DISTÂNCIA AO PONTO DE FALTA.....	127
8.1 - Considerações Iniciais.....	127
8.2 - Resultados dos Algoritmos Analíticos.....	127
8.2.1 - Método 1.....	128
8.2.2 - Método 2.....	131
8.2.3 - Influência de Variações nas Cargas Durante as Faltas.....	134
8.3 - Resultados da Metodologia Baseada em Redes Neurais.....	137

8.3.1 - Erros de Treinamento e Validação.....	138
8.3.2 - Faltas em Derivações Laterais.....	142
8.4 - Resultados no Segundo Alimentador-Teste.....	144
8.4.1 - Método 1.....	144
8.4.2 - Método 2.....	146
8.4.3 - Novas Comparações com o Método da componente Reativa.....	147
8.4.4 - Método Baseado em Redes Neurais.....	148
8.5 - Estudos de Sensibilidade.....	152
8.5.1 - Métodos Analíticos.....	152
8.5.2 - Método Baseado em Redes Neurais.....	157
8.6 - Considerações Finais.....	161
9. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	163
9.1 - Conclusões.....	163
9.1.1 - Métodos Analíticos.....	164
9.1.2 - Método Baseado em Redes Neurais.....	165
9.2 - Trabalhos Futuros.....	167
9.2.1 - Implantação do Sistema “em Campo”	167
9.2.2 - Inclusão de Informações Adicionais nas Equações dos Métodos Analíticos.....	167
9.2.3 - Agregar novos Dispositivos aos Modelos dos Alimentadores.....	168
9.2.4 - Testes da Metodologia Baseada em Redes Neurais Incluindo Componentes Harmônicas.....	168

ANEXO A – Algoritmo dos Mínimos Quadrados.....	169
ANEXO B – Dados do Primeiro Alimentador-Teste.....	173
ANEXO C – Dados do Segundo Alimentador-Teste.....	178
REFERÊNCIAS.....	184

SIMBOLOGIA

Y_i : Admitância concentrada de carga no ponto i ; (Ω^{-1})

G_i, B_i : Componentes de condutância e susceptância da carga no ponto i ; (Ω^{-1})

V_{oi} : Tensão inicial no ponto i ; (V)

V_i : Tensão genérica no ponto i ; (V)

n_p, n_q : Constantes do modelo de reposta estática;

a, b, c : Fases elétricas a, b, c ;

t : Terra;

Z_i : Impedância concentrada ou vista do ponto i ; (Ω)

I_i : Corrente fasorial genérica que sai do ponto i ; (A)

f : Ponto de falta;

d : Distância do início de um trecho ao ponto de falta; (km);

R_f : Resistência de falta (Ω);

z_{ij} : Impedância genérica por unidade de comprimento do trecho $i-j$; (Ω/km)

r_{ij} : Resistência genérica por unidade de comprimento do trecho $i-j$; (Ω/km)

x_{ij} : Reatância genérica por unidade de comprimento do trecho $i-j$; (Ω/km)

Z_{eq} : Impedância de carga equivalente; (Ω)

R_{eq} : Resistência de carga equivalente; (Ω)

X_{eq} : Reatância de carga equivalente; (Ω)

Z_l : Impedância de carga genérica; (Ω)

R_l : Resistência de carga genérica; (Ω)

X_l : Reatância de carga genérica; (Ω)

vel : Velocidade de propagação de onda em um condutor;

t : Tempo;

Z_{aa}, Z_{bb}, Z_{cc} : Impedância própria genérica concentrada de seção das fases a, b, c ; (Ω)

Z_{ab} : Impedância mútua genérica concentrada de seção entre as fases a e b ; (Ω)

Z_{bc} : Impedância mútua genérica concentrada de seção entre as fases b e c ; (Ω)

Z_{ca} : Impedância mútua genérica concentrada de seção entre as fases c e a ; (Ω)

V_a, V_b, V_c : Tensões nas fases a, b, c ; (V)

I_a, I_b, I_c : Correntes nas fases a, b, c ; (A)

Z_p : Impedância própria em modelo transposto-equivalente; (Ω)

Z_m : Impedância mútua em modelo transposto-equivalente; (Ω)

Z_0, Z_1, Z_2 : Impedância de seqüência positiva, negativa e zero; (Ω)

S_m = Potência total medida (kVA);

S_{total} = Somatório das potências nominais dos transformadores de distribuição (kVA).

FA: Fator de alocação de carga;

S_i : Estimativa da Potência complexa suprida a i ; (kVA)

V_{fi} : Tensão medida na fase faltosa i , no período em falta (V),

I_{fi} : Estimativa da corrente de falta a partir da subestação (A);

$o(\cdot)$: Ordem de grandeza do argumento;

ξ : Limiar para detecção e identificação de falta;

x : Comprimento do trecho $s-r$ (km);

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensões nas fases a, b, c no ponto s ; (V)

I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : Correntes nas fases a, b, c no ponto s ; (V)

z_{sraa} : Reatância por unidade de comprimento do trecho $s-r$ (própria da fase a); (Ω/km)

z_{srbb} : Reatância por unidade de comprimento do trecho $s-r$ (própria da fase b); (Ω/km)

z_{srcc} : Reatância por unidade de comprimento do trecho $s-r$ (própria da fase c); (Ω/km)

z_{srab} : Reatância por unidade de comprimento do trecho $s-r$ (mútuas fases $a-b$); (Ω/km)

z_{srbc} : Reatância por unidade de comprimento do trecho $s-r$ (mútuas fases $b-c$); (Ω/km)

z_{srac} : Reatância por unidade de comprimento do trecho $s-r$ (mútuas fases $c-a$); (Ω/km)

Z_{la}, Z_{lb}, Z_{lc} : Impedâncias concentradas de carga equivalente nas fases a, b, c ; (Ω)

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensões nas fases a, b, c no ponto r ; (V)

I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : Correntes nas fases a, b, c no ponto r ; (V)

I_{la}, I_{lb}, I_{lc} : Correntes para as cargas nas fases a, b, c do alimentador equivalente; (A)

z_{rlaa} : Reatância por unidade de comprimento do trecho $r-l$ (própria da fase a); (Ω/km)

z_{rlbb} : Reatância por unidade de comprimento do trecho $r-l$ (própria da fase b); (Ω/km)

z_{rlcc} : Reatância por unidade de comprimento do trecho $r-l$ (própria da fase c); (Ω/km)

z_{rlab} : Reatância por unidade de comprimento do trecho $r-l$ (mútuas fases $a-b$); (Ω/km)

z_{rlbc} : Reatância por unidade de comprimento do trecho $r-l$ (mútuas fases $b-c$); (Ω/km)

z_{rlac} : Reatância por unidade de comprimento do trecho $r-l$ (mútuas fases $c-a$); (Ω/km)

K_{ft} : Contante para cálculo de faltas fase-terra no método 1;

K_{ff} : Contante para cálculo de faltas entre fases no método 1;

R_t : Resistência para terra em faltas entre fases (Ω);

V_{s1}, V_{s2}, V_{s0} : Tensão de seqüência positiva, negativa e zero em s ; (V)

I_{s1}, I_{s2}, I_{s0} : Corrente de seqüência positiva, negativa e zero em s ; (A)

V_s : Tensão genérica no ponto s ; (V)

I_s : Corrente genérica no ponto s ; (A)

z_{sr} : Impedância genérica por unidade de comprimento do trecho $s-r$; (Ω/km)

y : Comprimento do trecho $r-l$; (km)

z_{rl} : Impedância genérica por unidade de comprimento do trecho $r-l$; (Ω/km)

I_f : Corrente de falta genérica; (A)

V_f : Tensão de falta genérica; (V)

V_{f1}, V_{f2}, V_{f0} : Tensão de seqüência positiva, negativa e zero em f ; (V)

I_{f1}, I_{f2}, I_{f0} : Corrente de seqüência positiva, negativa e zero em f ; (A)

I_{fr} : Corrente genérica que flui no sentido $f-r$; (A)
 I_{fl} : Corrente genérica que flui no sentido $f-l$; (A)
 Y_L : Admitância genérica de carga; (Ω^{-1})
 tol : Tolerância para a convergência do método 2;
 Σ : Somatório;
 e_j : Erro na saída do neurônio j ;
 y_j, v_j : Saída e entrada de função de ativação;
 d_j : Saída desejada do neurônio j ;
 $\xi(n)$: Energia total do erro na iteração n ;
 ξ_{med} : Erro médio quadrático sobre o conjunto de N amostras;
 ω_{ij} : Pesos sinápticos nas conexões dos neurônios entre as camadas $i-j$;
 α = Constante de momento;
 η = Taxa de aprendizado;
NC: Número de níveis de carregamento considerado para treinamento de rede neural;
NF_T: Número de fases do trecho;
NR: Número de valores da resistência de falta;
N: Número de amostras de treinamento;
 $x(t)$: Sinal genérico no domínio do tempo;
 X_i : Amplitude da componente i do sinal genérico $x(t)$;
 ω_0 : Frequência angular fundamental; (rad/s)
 θ_n : Fase da componente harmônica de ordem n ; (graus)
 τ : Constante de tempo da componente exponencial decrescente;
N: Ordem da harmônica de mais alta ordem a ser considerada;
 X_0 : Magnitude da componente exponencial em $t = 0$;

X_n = Magnitude da componente harmônica de ordem n ;

θ_n = Fase da componente harmônica de ordem n ;

f_s = Frequência de amostragem do sinal; (Hz)

m : Número da amostra do sinal;

$[A]$ = Matriz de coeficientes do algoritmo dos mínimos quadrados;

$[\bar{x}]$ = Estimativa dos elementos do vetor $[x]$;

$[b]$ = Vetor de amostras do sinal $x(t)$.

z_{abc} = Matriz de impedâncias de fase por unidade de comprimento;

y_{abc} = Matriz de admitâncias de fase por unidade de comprimento.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas de distribuição provêm as conexões finais entre os sistemas de energia elétrica e os consumidores. Tais sistemas estão expostos a um elevado número de faltas que provocam desligamentos. Devido a características bastante peculiares, tende a não ser adequado aplicar as mesmas técnicas utilizadas em uma linha de transmissão para se determinar a localização de faltas em um alimentador de distribuição.

Ao longo de muitos anos, os sistemas de distribuição foram tratados como o componente do sistema elétrico menos atrativo a se trabalhar. Tanto que, o número de desenvolvimentos dedicados à solução de problemas em redes interconectadas de alta-tensão é consideravelmente maior. Os métodos para modelagem e análise também estão se desenvolvendo tardiamente, no contexto da distribuição, seguindo o mesmo raciocínio comparativo anterior. Porém, a competição entre as empresas do setor e a demanda crescente por energia de qualidade têm trazido à tona a necessidade de melhorias na solução dos problemas inerentes a esses sistemas.

Entre os requisitos à melhoria da qualidade no fornecimento de energia está o rápido restabelecimento do fornecimento após desligamentos originados por faltas nos alimentadores. Para que isso seja possível é altamente desejável que as equipes de campo tenham uma indicação precisa do local da falta (a qual deve ser eliminada para que o religamento do sistema seja possível). A obtenção dessa indicação pode ser automatizada,

mas deve levar em conta as características reais e os procedimentos adequados para modelar o comportamento dos alimentadores.

1.2 DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

O método primitivo, porém altamente empregado ao longo dos anos, para localização de faltas em redes elétricas é o de inspeção visual (STRINGFIELD et al., 1957). A partir de reclamações provenientes de consumidores ou da constatação de desligamento do fornecimento de energia na subestação, equipes são enviadas a campo para inspecionar a rede elétrica visualmente até localizar o defeito. A inspeção visual pura é um método lento e, portanto, limitado, embora a sua importância histórica não possa ser desprezada.

A utilização de sinalizadores de faltas, que emitem um sinal luminoso ao detectar faltas além do trecho em que estão instalados, veio a ser uma ferramenta auxiliar para diminuir a área a ser inspecionada visualmente, mas para uma efetiva determinação do ponto de falta a partir desses dispositivos é preciso que o espaçamento entre eles seja pequeno, o que eleva os custos de instalação do sistema (principalmente em redes elétricas com vários quilômetros de extensão). Eles podem, entretanto, auxiliar na determinação da falta complementando outras ferramentas.

Tendo em conta o exposto acima e a crescente utilização da tecnologia digital em subestações, inúmeros métodos automáticos para localização de faltas a partir de sinais medidos na subestação têm sido desenvolvidos. Existem diversas abordagens possíveis para desenvolver esse tipo de ferramenta. Neste ponto, cabe citar as duas principais, em função do tipo de dado que é utilizado para a obtenção da indicação de interesse.

O primeiro grupo de métodos emprega componentes fundamentais de tensões e

correntes. É uma abordagem de grande interesse prático, devido a sua relativa simplicidade de implementação. A maneira mais empregada para se obter a localização da falta, nessa abordagem, é a medida da componente reativa da impedância (WARRINGTON et al., 1968), a qual é proporcional à distância ao ponto do defeito. Existem métodos que utilizam medições de um terminal (TAKAGY et al., 1982), e os que utilizam medições provenientes dos dois terminais da linha (JOHNS et al., 1990, SACHDEV et al., 1988).

Os métodos que utilizam informações provenientes dos transitórios originados pelas faltas constituem o segundo grupo. Os principais métodos dessa categoria são os que utilizam ondas viajantes (LEWIS, 1951), obtendo uma estimativa para a localização da falta a partir dos instantes de chegada dessas a unidades de aquisição e processamento de sinais. Ondas viajantes são originadas na ocorrência de surtos, como faltas e chaveamentos, e se propagam em direção aos terminais do sistema em falta, refletindo-se continuamente nesses e no próprio ponto de falta. É necessário, nesse caso, se conhecer a velocidade de propagação de tais ondas no condutor em falta.

Nas duas abordagens citadas acima, quando o método tiver sido desenvolvido para uso principal em redes interconectadas de transmissão, não é trivial aplicá-los a alimentadores de distribuição, e sequer factível em determinados casos. Isso tem sido objeto de desenvolvimentos de diversos pesquisadores que propuseram métodos específicos a esse tipo de rede elétrica, levando em conta algumas de suas características mais importantes, conforme descrito a seguir.

1.3 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES ELÉTRICAS DE DISTRIBUIÇÃO

As principais características que diferenciam o problema de localização de faltas

em alimentadores de distribuição, daquele em linhas de transmissão são as seguintes:

- Radialidade;
- Carregamento significativamente desequilibrado entre as fases;
- Presença de cargas alocadas ao longo do alimentador, e não somente no seu extremo;
- Derivações laterais de uma, duas, ou três fases, que se originam do tronco principal;
- Não-homogeneidade dos alimentadores, devido a sua construção que tende a utilizar diferentes condutores e configurações de posicionamento dos mesmos nos postes de sustentação;
- Monitoramento apenas na subestação, em geral.

Esse conjunto de características tem grandes implicações no desenvolvimento de ferramentas para localização de faltas.

As características topológicas e elétricas citadas acima serão melhor analisadas em capítulos posteriores.

O monitoramento apenas na subestação faz com que nem todas as variáveis que poderiam auxiliar na localização de faltas sejam monitoradas pelas empresas distribuidoras. Embora seja crescente o emprego de tecnologias de monitoramento e automação para sistemas de distribuição (LIU et al., 2002), essa não é ainda a realidade da maioria das empresas espalhadas pelo mundo. Entende-se que é preciso considerar esse fato, desenvolvendo preferencialmente métodos para localização de faltas hábeis a funcionar em um contexto realista e conservador. Logicamente, tais desenvolvimentos devem também estar aptos a utilizar informações adicionais provenientes de novos

sistemas de monitoramento.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho é contribuir no desenvolvimento de métodos para localização de faltas em alimentadores, levando em conta limitações relevantes dos métodos existentes. Fez-se a opção por desenvolver métodos que utilizem componentes de frequência fundamental de tensões e correntes medidas na origem do alimentador como dados de entrada.

Tal escolha foi motivada por se entender que tais métodos demandam por melhorias consideráveis, somado à relevância dessa abordagem. Procuraram-se levar em conta as características reais do problema, citadas no item anterior, nos desenvolvimentos. Os seguintes pontos principais sumarizam o que foi investigado no trabalho e as principais contribuições esperadas:

- Desenvolvimento de duas metodologias inovadoras baseadas na análise do alimentador em falta (métodos analíticos) para localização de faltas de baixa-impedância, e uma terceira metodologia, baseada em redes neurais, para localização de faltas de alta-impedância;
- O primeiro método analítico é direto, e permite a modelagem da não-transposição do alimentador nas equações para obtenção da distância ao ponto de falta e a compensação das correntes de suprimento às cargas;
- O segundo método analítico é iterativo, e busca simplificar os métodos similares baseados na característica resistiva da impedância de falta, obtendo respostas satisfatórias;

- A proposta da metodologia baseada em redes neurais leva devidamente em conta a estrutura ramificada, com derivações laterais, presentes em alimentadores, e permite a obtenção de uma saída proporcional à distância ao defeito em unidades de comprimento, seja qual for a localização da falta no alimentador;
- No contexto das redes neurais, entende-se que o trabalho pode ampliar as discussões sobre a aplicabilidade da técnica ao problema.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese está organizada em 9 capítulos e 3 anexos. A problemática, as questões fundamentais do problema, e algumas referências de caráter histórico foram descritas anteriormente. As principais contribuições do trabalho foram brevemente apresentadas.

O Capítulo 2 trata de sistemas de distribuição. São mostrados os principais componentes, e as características topológicas e elétricas dos alimentadores. Também são abordados alguns aspectos relativos a faltas e proteção.

O Capítulo 3 descreve os métodos existentes para localização de faltas no contexto estudado. Uma análise crítica das principais abordagens e dos métodos mais conhecidos é apresentada. As limitações dos métodos existentes são discutidas.

O Capítulo 4 apresenta os procedimentos iniciais, necessários à implementação dos novos métodos desenvolvidos. Esses procedimentos se referem à modelagem dos alimentadores, ao processamento dos sinais de entrada com a identificação das fases em falta, entre outros aspectos anteriores ao processo de localização de faltas.

O Capítulo 5 descreve o primeiro grupo de métodos desenvolvido: são os métodos analíticos para localização de faltas de baixa-impedância. Inicialmente, é descrita a

obtenção de um modelo equivalente, não-homogêneo, de dois terminais do alimentador. Posteriormente, são descritos os dois algoritmos, um direto e outro iterativo, que podem ser utilizados para o cálculo da distância ao ponto de falta.

No Capítulo 6 é descrita metodologia baseada em redes neurais. Foi desenvolvida uma nova técnica caracterizada por uma arquitetura modular de redes neurais independentes.

O Capítulo 7 trata da implementação dos métodos propostos, descrevendo o protótipo computacional desenvolvido, mostrando o seu funcionamento, e trazendo elementos complementares importantes para a sua implantação em um sistema real.

O Capítulo 8 traz resultados e análises de diversos testes dos métodos, principalmente com relação à exatidão das respostas dos módulos para cálculo da distância ao ponto de falta. Os resultados dos métodos propostos são avaliados, inclusive quanto à sua sensibilidade a possíveis erros nos parâmetros adotados.

O Capítulo 9 complementa os anteriores com as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros. As referências bibliográficas são apresentadas ao final do documento.

Os anexos são os seguintes:

- **ANEXO A** – Algoritmo dos Mínimos Quadrados;
- **ANEXO B** – Dados do Primeiro Alimentador-Teste;
- **ANEXO C** – Dados do Segundo Alimentador-Teste.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A figura 2.1 mostra os principais componentes de um sistema elétrico de potência, entre os quais estão os sistemas de distribuição. Este capítulo apresenta tópicos relacionados à teoria de tais sistemas, importantes no contexto do trabalho introduzido no capítulo anterior.

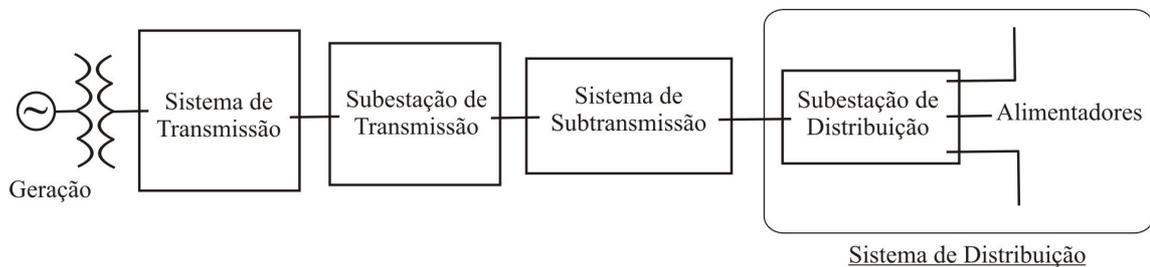


Figura 2.1 - Principais Componentes de um Sistema Elétrico de Potência.

2.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O componente inicial de um sistema de distribuição típico é a subestação de distribuição. A figura 2.2 ilustra os componentes mais comuns de uma subestação desse tipo. A subestação é servida por linhas de transmissão ou subtransmissão. Um ou mais alimentadores são originados na subestação. Os alimentadores são radiais, ou seja, a corrente flui em um único sentido da subestação para as cargas. Redes com geração

distribuída, cujo estudo não está sendo considerado no escopo deste trabalho, podem apresentar fluxo bidirecional de corrente.

A função primordial de uma subestação de distribuição é a redução do nível de tensão da transmissão ou sub-transmissão à tensão de distribuição, bem como a regulação de tensão nos níveis especificados. Os níveis de tensão de distribuição variam de acordo com a empresa distribuidora, a topologia, e as cargas conectadas ao alimentador. No Brasil, estado de Santa Catarina, os valores mais empregados são 13,8 kV e 23 kV. Nas empresas espalhadas pelo mundo alguns valores encontrados são: 4,16 kV, 12,47 kV, 25 kV e 34,5 kV (STEVENSON, 1975).

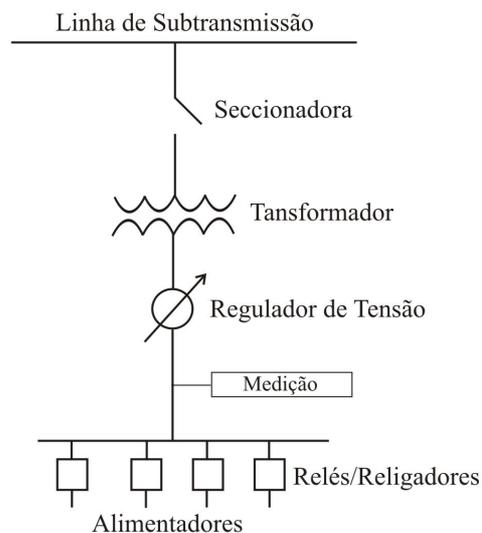


Figura 2.2 - Principais Componentes de uma Subestação de Distribuição.

O regulador de tensão mostrado na figura 2.2 está atuando no barramento de baixa tensão, mas reguladores de tensão individuais para cada alimentador constituem uma prática comum. Alimentadores mais longos podem possuir mais de um regulador de tensão ao longo de seu trajeto.

Toda a subestação de distribuição possui alguma forma de monitoramento (ou medição). As grandezas monitoradas dependem dos recursos disponíveis e do tipo de tecnologia empregada. As práticas variam desde medidores da corrente total fornecida pela subestação até a monitoração digital de valores máximos, médios e mínimos de tensão, corrente e potência em intervalos de tempo determinados (que variam de 15 minutos a 1 hora), para cada alimentador. Aplicações especiais, como localizadores de falta, devem empregar monitoramento digital de tensões e correntes em tempo real.

2.3 ALIMENTADORES RADIAIS

A figura 2.3 traz o diagrama de um alimentador radial, com seus principais elementos, a saber:

- Tronco principal do alimentador, trifásico;
- Derivações laterais de três fases;
- Derivações laterais de uma e duas fases;
- Bancos de capacitores;
- Transformadores de distribuição;
- Circuitos secundários;
- Cargas (consumidores).

Os nós indicam pontos de conexão de diferentes segmentos ou componentes (serão salientados nos diagramas apenas em casos onde for necessário para a interpretação dos mesmos). O tronco principal do alimentador trifásico é derivado lateralmente. As expansões podem ser trifásicas como o tronco principal, ou possuir uma ou duas fases.

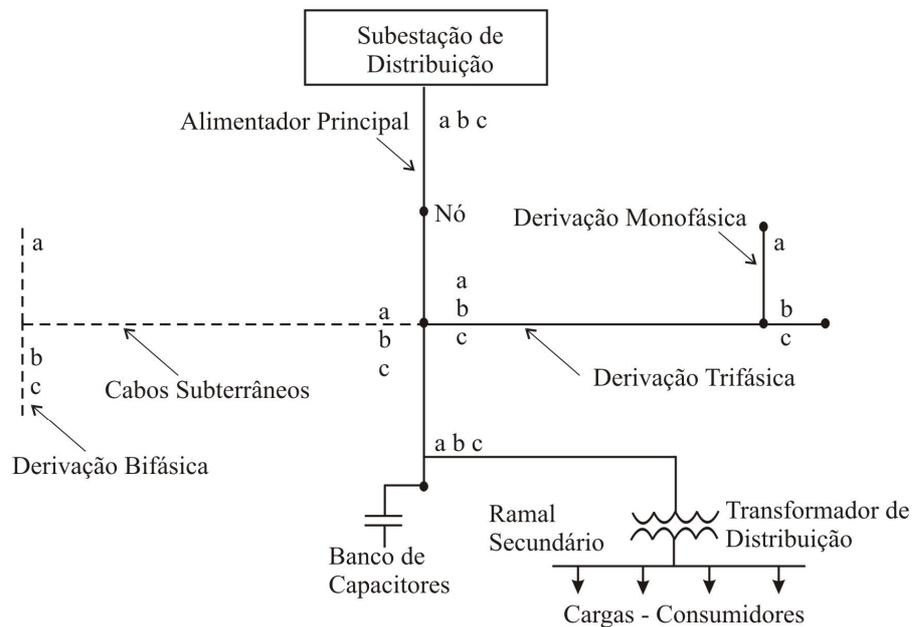


Figura 2.3 - Alimentador Radial de Distribuição.

O comprimento dos alimentadores pode apresentar valores diversos. Na base de dados do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), que provêm alimentadores-padrões para estudos em sistemas de distribuição, existem alimentadores de algumas centenas de metros, até extensões superiores a 50 km (informações detalhadas no endereço eletrônico <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>, último acesso: dezembro/2005).

O carregamento das três fases é diferente, na quase totalidade dos casos. Por isso, os programas convencionais para análise de redes elétricas de transmissão em regime permanente, que assumem o carregamento equilibrado entre as fases, tendem a não apresentar bons resultados quando aplicados a redes de distribuição. Ainda que um carregamento médio seja assumido para as três fases, a característica radial dos alimentadores faz com que tais programas não apresentem boa convergência. Por isso,

métodos iterativos baseados em injeções de corrente (SHIMOHAMMADI et al., 1988) ou potência (MEDEIROS et al., 1995) são mais adequados.

Na figura 2.3 é ilustrado também um trecho do alimentador constituído por cabos subterrâneos. Embora a maioria dos casos estudados neste trabalho estará se referindo a linhas de distribuição aéreas, é importante citar o crescente emprego de cabos subterrâneos na constituição de porções de alimentadores, ou na totalidade dos mesmos.

2.3.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Somado ao desequilíbrio das cargas nas três fases, os alimentadores de distribuição são *não-transpostos*. O espaçamento entre os condutores não é igual entre as três fases e não apresenta, em muitos casos, simetria geométrica. Esse fato tem profundas implicações nos métodos de análise, nos modelos empregados e no desacoplamento matemático das três fases via transformações modais (SILVEIRA, 2001). Além disso, um desequilíbrio adicional no perfil de tensões e carregamento das três fases é introduzido.

A figura 2.4 ilustra devidamente este fato, mostrando três configurações comumente empregadas em alimentadores aéreos (KERSTING, 2001). As medidas são dadas em metros. O código ID se refere ao tipo de espaçamento utilizado entre os condutores, e entre esses e a terra.

Na configuração de três fases e um condutor neutro ID-500, por exemplo, a determinação da impedância equivalente das fases envolvidas deverá resultar em valores diferentes para as três fases e para os acoplamentos mútuos, mesmo que os condutores empregados sejam iguais em todas as fases. As configurações ID-505 e ID 510 são, respectivamente, de duas e uma fases, com condutor neutro.

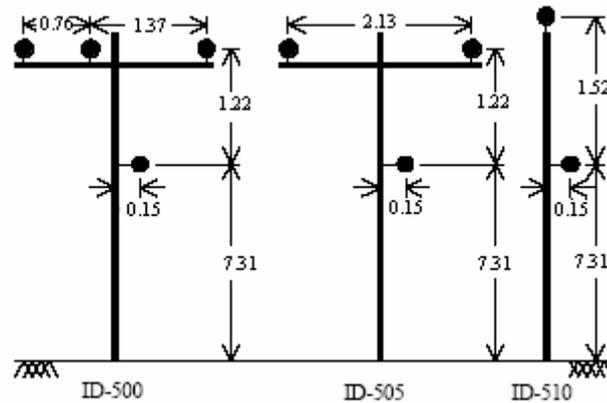


Figura 2.4 - Configurações de Condutores Empregadas em Alimentadores Aéreos.

2.3.2 CARACTERÍSTICAS DE CARREGAMENTO

Além da característica de desequilíbrio entre as fases, citada anteriormente, é importante analisar o perfil de carregamento de um alimentador de distribuição com relação à demanda suprida. Diversos tipos de consumidores são, em geral, atendidos por um alimentador, e têm picos de demanda em horários distintos. A curva de demanda total, que constitui o somatório de todos os consumidores, possui, contudo um formato suave.

A figura 2.5 ilustra uma curva de demanda que é comum em alimentadores urbanos. Logicamente, a diferença entre os valores máximos e mínimos de demanda, bem como os horários em que eles ocorrem dependem de diversos fatores: regionais, do tipo predominante de consumidor (residencial, comercial ou industrial), entre outros.

As curvas de demanda diária de um alimentador devem ser analisadas na implementação computacional de modelos do mesmo. É importante avaliar quais os cenários mais comuns que devem servir de base para estudos de operação e planejamento. O conhecimento dos valores médio, mínimo e máximo de demanda esperados podem ser utilizados em estudos de sensibilidade de determinadas variáveis face à variação da carga.

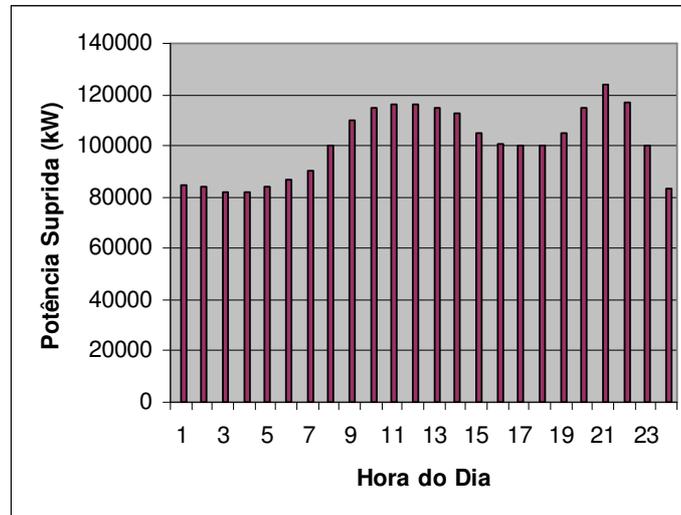


Figura 2.5 - Exemplo de Curva de Demanda de um Alimentador de Distribuição

Fonte: Referência KERSTING (2002).

Cada ponto de carga de um alimentador de distribuição pode ser modelado como uma admitância, cujos valores variam em função de variações na tensão em seus terminais, nos chamados *modelos de resposta estática* (SRINIVASAN, 1981). Essa admitância será aqui denotada por Y_i . As suas componentes, G_i e B_i , sofrem alterações com a variação da tensão nos terminais da carga, conforme expressa a equação (2.1). À medida que a magnitude da tensão na carga varia de V_{oi} para V_i , os coeficientes n_p e n_q determinam a variação nas componentes de Y_i .

$$Y_i = G_i \left| \frac{V_i}{V_{oi}} \right|^{n_p - 2} + j B_i \left| \frac{V_i}{V_{oi}} \right|^{n_q - 2} \quad (2.1)$$

Os valores comumente assumidos para n_p e n_q constam na tabela 2.1, de acordo com os três principais tipos de cargas presentes em alimentadores.

Esse modelo pode ser também utilizado para modelar cargas constituídas por

combinações dos três tipos principais listados na tabela. Os tipos mais comuns de carga são impedâncias constantes, como cargas para iluminação e aquecimento, e potência constante, como motores elétricos.

Tabela 2.1 - Valores adotados para os coeficientes n_p e n_q .

<i>Tipo de Carga</i>	n_p	n_q
Impedância constante	2	2
Potência constante	0	0
Corrente constante	1	1

2.4 FALTAS EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO

Entre as principais causas de faltas em alimentadores, podem-se citar:

- Falhas em isoladores;
- Contatos de árvores ou animais com os condutores;
- Fatores climáticos (tempestades, ventos, neve, etc.);
- Acidentes de trânsito e vandalismo;
- Rompimento ou queda de condutores.

2.4.1 TIPOS DE FALTA

Neste trabalho, a referência ao termo *tipo de falta* remete à identificação das fases elétricas envolvidas no defeito.

A grande maioria das faltas em alimentadores de distribuição envolve uma das três fases e a terra. Tanto que, existem métodos para localização de faltas desenvolvidos apenas para esse tipo de falta (DAS et al., 1995, SANTOSO et al., 2000). Outros tipos de falta

possíveis de ocorrer são faltas entre fases, que podem envolver a terra ou não. Por conseguinte, existem onze tipos de falta possíveis, que correspondem às diferentes combinações entre as três fases e a terra.

As três fases serão denotadas ao longo deste trabalho pelas letras minúsculas a , b e c . A terra será denotada por t . Assim, define-se uma falta $b-t$ como sendo aquela que envolve a fase b e a terra, raciocínio que deve ser estendido aos demais tipos de falta.

2.4.2 RESISTÊNCIA DE FALTA

Faltas em sistemas de distribuição podem ser modeladas por uma impedância puramente resistiva, hipótese assumida em diversos trabalhos que descrevem métodos para localização de faltas (a serem descritos no Capítulo 3). O valor da resistência de falta depende da causa e do tipo da falta.

É comum se estabelecer relações entre a resistência de falta e a sua causa. Em SOUSA et al., (2005) são mostrados exemplos de faltas originadas por contatos de árvores, que atingem valores entre 70 e 160 Ω . No mesmo trabalho, faltas com valores inferiores de resistência de falta correspondem a relatos de outras causas, como descargas atmosféricas.

Para faltas entre fases o valor da resistência de falta, em geral, é baixo, da ordem de alguns Ohms, dado a curta extensão do caminho entre dois condutores. Faltas desse tipo são exemplos de *faltas de baixa-impedância*.

Quando um condutor toca o solo, a resistência de falta pode assumir valores bastante elevados, da ordem de centenas de Ohms (LI et al., 2001), dependendo do tipo de superfície e da umidade. Nesses casos, a falta torna-se difícil de ser detectada e isolada, constituindo uma situação de risco à integridade física de pessoas que passam pelo local do defeito. Faltas desse tipo são chamadas de *faltas de alta-impedância*.

Quando um condutor toca a torre que o sustenta, a resistência de falta é composta

pelo somatório da resistência de contato do condutor com a torre; da resistência da torre; da resistência do contato da base da torre com o solo, e da resistência de aterramento. A resistência de aterramento não excede valores da ordem de alguns Ohms. Já a resistência de contato das torres com a terra pode chegar a dezenas de Ohms (DAS, 1998).

2.4.3 FALTAS PERMANENTES E FALTAS TEMPORÁRIAS

Faltas permanentes são aquelas cuja causa não se auto-extingue, provocando o desligamento de trechos do alimentador por atuação da proteção, até que o fator causador seja eliminado (como um galho de árvore que cai e permanece sobre os condutores).

Faltas temporárias são aquelas cuja causa se auto-extingue, ou se extingue com o desligamento do alimentador por alguns instantes, podendo ser religado em seguida (como um arco elétrico que se estabelece pela aproximação de condutores na ocorrência de um vento forte).

Os métodos para localização de faltas desenvolvidos neste trabalho serão primordialmente voltados a faltas permanentes. Contudo, indicações de distância ao ponto de falta obtidas para faltas temporárias podem ser armazenadas para auxiliar em inspeções de manutenção no sentido de evitar a repetição de eventos desse tipo.

2.5 PROTEÇÃO DE ALIMENTADORES

O esquema típico usado para proteção de alimentadores (ANDERSON, 1999, STEWART, 2004) é composto por um religador e fusíveis para proteção de trechos remotos e das derivações laterais. Um esquema de proteção desse tipo deve ser capaz de lidar de forma eficiente com faltas temporárias ou permanentes.

O religador é um equipamento de proteção a sobrecorrentes utilizado em circuitos

aéreos de distribuição, que opera ao detectar correntes de curto-circuito, desligando e religando automaticamente o circuito um número predeterminado de vezes. Religadores são, em geral, instalados no início do alimentador. Porém, algumas empresas distribuidoras os empregam em posições remotas, a fim de melhorar a seletividade do esquema.

Quando uma falta é detectada por um religador, o circuito por ele protegido é desligado e religado posteriormente em uma seqüência típica que varia de 1 a 4 operações (ELETROBRAS, 1982), com temporizações variáveis. De acordo com ARAÚJO et al. (2005) em circuitos de alimentadores em 13,8 kV, normalmente se empregam duas seqüências de desligamento/religamento, temporizadas em 3 e 15 segundos. Em circuitos de 25 kV, emprega-se uma operação apenas, temporizada em 15 segundos.

Durante a atuação do religador é necessário que a proteção atue no sentido de isolar o trecho em falta do alimentador, caso ele esteja associado a derivações laterais do mesmo, que são normalmente protegidos por chaves fusíveis. O emprego de chaves fusíveis também é conveniente para trechos remotos, por ser uma solução barata para melhorar a seletividade do esquema. A localização dos fusíveis deve ser determinada de modo a desligar o menor número de consumidores possível, ao mesmo tempo em que assegura a devida proteção ao sistema.

Entretanto, chaves-fusíveis não são dispositivos de confiabilidade elevada, devido principalmente a mudanças de suas características ao longo do tempo e da operação do sistema onde estão instalados. *Seccionalizadores* automáticos, que interrompem o circuito em condição de sobrecorrente e coordenados com o religador, podem ser usados com a mesma finalidade (de melhorar a seletividade do esquema de proteção), sendo equipamentos mais confiáveis (ARAÚJO et al., 2005), embora associados a maiores custos.

A figura 2.6 está ilustrando um esquema simples do tipo religador/chave fusível. No exemplo mostrado, no caso da falta ser permanente, apenas o trecho além do fusível conectado ao nó que origina o lateral em falta seria, em princípio, desligado (o ponto f indica o local da falta). Logicamente que, para o esquema funcionar corretamente, a corrente para ruptura do fusível, bem como o tempo para o qual ela ocorre, devem estar coordenados com o religador, no sentido de que o fusível só deverá desligar o trecho protegido por ele depois que o religador completar sua seqüência de operações.

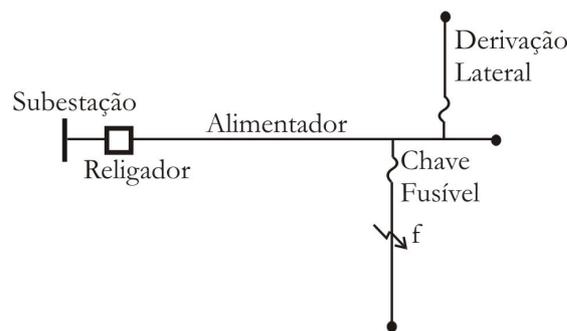


Figura 2.6 - Esquema Religador-Chave Fusível.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Características importantes dos sistemas de distribuição foram apresentadas neste capítulo. Além dos principais componentes, suas características topológicas e de carregamento, foram abordados tópicos sobre a ocorrência de faltas. Nesse contexto, o próximo capítulo descreve e analisa métodos para localização de faltas em redes elétricas de distribuição.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo descreve métodos para localização de faltas que vêm sendo aplicados em alimentadores de distribuição. No Capítulo 1 foram citadas duas abordagens principais: métodos baseados na componente fundamental e métodos que empregam informações contidas nos transitórios de falta. Além desses, fez-se a opção por criar aqui um terceiro grupo que se refere à maneira de processamento dos dados de entrada, devido à sua crescente importância: os métodos baseados em redes neurais artificiais (ou simplesmente, redes neurais). Uma análise crítica das abordagens é feita, juntamente com a descrição dos trabalhos pesquisados na literatura especializada.

3.2 MÉTODOS BASEADOS NA COMPONENTE FUNDAMENTAL

3.2.1 MÉTODO DA COMPONENTE REATIVA DA IMPEDÂNCIA

O método da componente reativa da impedância (WARRINGTON et al., 1968) vem sendo empregado há muitos anos em localizadores digitais de falta (SANT et al., 1979), e é a metodologia mais popular nesse contexto. Aplicações da técnica em sistemas de distribuição também são usuais (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2004).

A figura 3.1 serve para ilustrar o princípio de funcionamento do método. A impedância Z_i , vista do terminal i , pode ser obtida através da equação 3.1:

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} \quad (3.1)$$

Escrevendo-se a impedância do alimentador por unidade de comprimento como sendo composta por uma componente resistiva e uma componente reativa ($z_{ij} = r_{ij} + jx_{ij}$), e considerando a impedância de falta R_f puramente resistiva, a impedância Z_i pode ser escrita como:

$$Z_i = d.(r_{ij} + jx_{ij}) + R_f \quad (3.2)$$

Nessas condições, a componente reativa de Z_i fornece a distância ao ponto de falta, já que se conhece a reatância do condutor por unidade de comprimento na equação 3.3:

$$d = \frac{im(Z_i)}{x_{ij}} \quad (3.3)$$

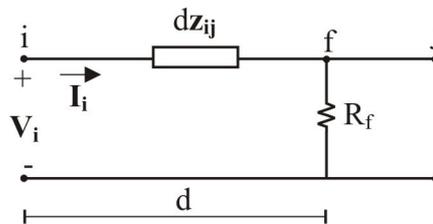


Figura 3.1 - Circuito para o Método da Componente Reativa da Impedância.

O método da componente reativa da impedância tem diversas limitações que prejudicam o seu emprego a sistemas de distribuição. Duas delas podem ser contornadas através de procedimentos adequados no próprio método:

- A descrição feita para um equivalente monofásico não é adequada a redes trifásicas com fases mutuamente acopladas, desequilibradas, e para casos de

faltas envolvendo uma ou duas fases;

- A linha de dois terminais homogênea utilizada na descrição não corresponde ao que foi citado no Capítulo 1: as características dos alimentadores mudam ao longo de seu trajeto.

Duas outras limitações merecem ser melhor analisadas, por serem comuns a outros métodos:

3.2.1.1 Erros com o aumento de R_f

Métodos que não consideram a influência das cargas tendem a erros elevados quando a resistência de falta aumenta. A figura 3.2 mostra o mesmo circuito apresentado anteriormente, porém contendo uma carga com componente reativa alocada no extremo j (representada pela impedância $Z_l = R_l + jX_l$). A componente reativa da impedância equivalente vista do terminal i , nesse caso, passa a não ser mais igual à reatância da linha até o ponto de falta (hipótese válida para faltas sólidas ou em casos onde a corrente de carga pode ser desprezada).

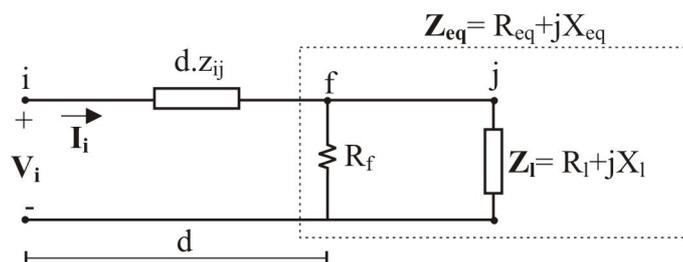


Figura 3.2 - Circuito com Carga.

Esse fato é expresso pela equação 3.4, note o aparecimento de mais uma componente reativa em Z_i , dada por jX_{eq} . Essa parcela, que não é levada em conta nos cálculos, provoca erros na estimativa resultante para d .

$$Z_i = d.(r_{ij} + jx_{ij}) + R_{eq} + jX_{eq} \tag{3.4}$$

3.2.1.2 Múltiplas estimativas para a localização da falta

Em um alimentador com derivações laterais, faltas em mais de um ponto podem levar a valores semelhantes de tensões e correntes na subestação. Assim sendo, múltiplas estimativas seriam obtidas para a localização da falta a partir unicamente da informação da componente reativa da impedância.

A figura 3.3 ilustra isso: ao se medir a componente reativa da impedância na subestação, na ocorrência da falta em *f*, outros pontos equidistantes, como os mostrados na figura (indicados por localização possível 1 e 2), também podem ser coerentes com a estimativa obtida, apesar de não corresponderem à real localização da falta. É necessário algum meio para eliminar estimativas como essas.

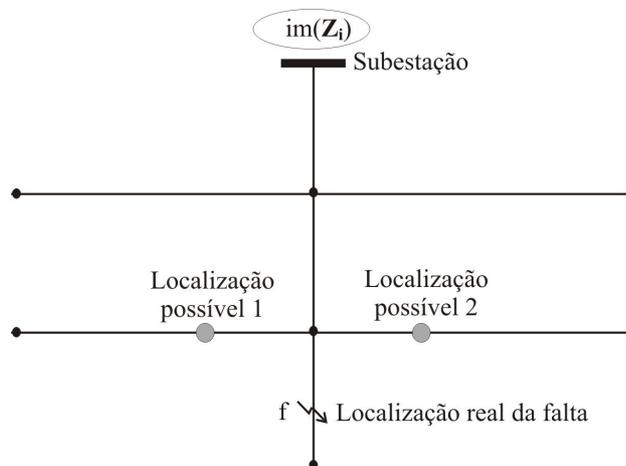


Figura 3.3 - Estimativas Errôneas Possíveis para a Localização da Falta.

3.2.2 MÉTODOS ITERATIVOS BASEADOS NA CARACTERÍSTICA DA IMPEDÂNCIA DE FALTA

O equacionamento iterativo com base na característica resistiva da impedância de

falta deu origem a novos métodos, com desempenho superior ao da componente reativa da impedância. Eles se baseiam em equações que expressem tal característica, porém, levando em conta o carregamento do sistema.

O principal trabalho nessa linha é o de SRINIVASAN et al. (1989). A descrição feita pelos autores utiliza o diagrama da figura 3.4. O ponto s corresponde à subestação, onde as variáveis V_s e I_s são monitoradas. O ponto r corresponde ao extremo remoto onde a carga é alocada. O algoritmo para cálculo da distância d ao ponto de falta consiste nos seguintes passos:

1. Obtenção das tensões e correntes de seqüência positiva, negativa e zero no início do alimentador, antes e durante a falta;
2. Cálculo da impedância característica do alimentador, para cada uma das seqüências;
3. Atribui-se um valor inicial para a distância d ;
4. Calculam-se as tensões e correntes no ponto de falta e na carga, a partir das medições e parâmetros do alimentador. Utiliza-se o modelo a *parâmetros distribuídos* para relacionar tensões e correntes ao longo do mesmo;
5. Atualiza-se a impedância da carga a partir do valor obtido para a tensão nos seus terminais. A carga é modelada levando-se em conta variações na sua admitância em função da tensão;
6. Verifica-se se a componente imaginária da impedância de falta para um dado valor de distância é igual a zero. Caso essa condição não seja satisfeita, repetem-se os passos 4-6 até a convergência.

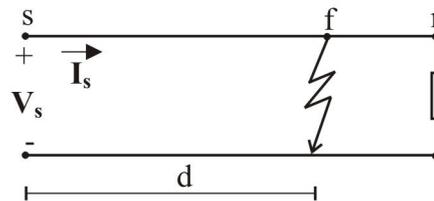


Figura 3.4 - Circuito para Descrição do Método de Srinivasan et al. (1989).

A impedância de falta é obtida em função das variáveis de seqüência calculadas no ponto de falta, de acordo com as fases envolvidas no defeito.

Uma extensão do algoritmo possibilita o seu emprego a casos onde existem cargas alocadas entre a subestação e o ponto de falta, bem como entre esse e o extremo remoto, como o exemplo mostrado na figura 3.5. Note que existem cargas alocadas entre a subestação e a falta nos pontos *k* e *l*. Para tais casos, o procedimento descrito pelos autores baseia-se no cálculo das correntes consumidas pelas cargas intermediárias a cada iteração.

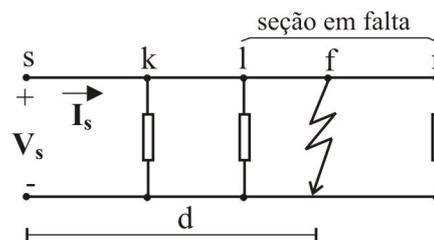


Figura 3.5 - Cargas Intermediárias no Método de Srinivasan et al. (1989).

É necessário, para tanto, se ter uma estimativa da *seção em falta* do alimentador. Esse conceito se refere ao segmento entre os dois pontos de carga no qual a falta incide. No caso mostrado, a seção em falta estaria entre os nós *l* e *r*. Em alimentadores reais, uma seção pode corresponder ao segmento entre dois nós quaisquer que podem limitar também

derivações laterais ou mudanças no tipo ou configuração dos condutores. O conceito de seção em falta é muito importante e será utilizado diversas vezes no decorrer deste documento.

Embora a formulação baseada na característica resistiva da impedância de falta, descrita por SRINIVASAN et al. (1989), represente um avanço nos métodos para localização de faltas em alimentadores radiais, algumas limitações podem ser apontadas:

- Derivações laterais não são consideradas na descrição do método;
- Não são fornecidos de forma explícita os procedimentos para o emprego do método em alimentadores não-homogêneos;
- O procedimento para identificação das faltas não é bem estruturado, sendo necessário testar o algoritmo para todos os tipos de falta e posteriormente selecionar a resposta que seja fisicamente viável;
- Os autores fornecem uma forma de obter uma estimativa inicial para a distância até o ponto de falta, porém o procedimento é altamente complexo e computacionalmente pesado. Possíveis erros na determinação da seção em falta utilizando essa estimativa não são discutidos;
- Não são fornecidos detalhes com relação à maneira como o valor da distância até o ponto de falta deve ser atualizado no cálculo iterativo dessa variável;
- Como não se conhece com exatidão as correntes das cargas, erros, certamente irão aparecer com o aumento da resistência de falta a partir de um determinado limiar (em faltas de alta-impedância), Estudos referentes a tais situações não são apresentados;
- A necessidade do modelo a parâmetros distribuídos empregado nos cálculos é

questionável. O comprimento dos alimentadores geralmente não ultrapassa algumas dezenas de quilômetros, o que favorece o emprego de modelos a parâmetros concentrados, e a capacitância do modelo π equivalente pode ser desprezada simplificando bastante as análises sem prejuízo nos resultados obtidos (STEVENSON, 1975);

- A formulação se vale dos conceitos de seqüência zero, positiva e negativa a partir da matriz de transformação de *Fortescue*, adequada para linhas transpostas. Nenhuma análise com relação à não-transposição presente em alimentadores é descrita, nem são apresentados procedimentos para se obter um modelo transposto-equivalente que possa ser empregado.

Aparte das suas limitações, a abordagem baseada na característica resistiva da impedância de falta serviu de base para outros desenvolvimentos. Em (REINER et al., 1999) é discutido um novo modelo, mais preciso segundo os autores, para a modelagem de cargas, que utiliza dados dos diferentes tipos de aparelhos e motores utilizados por consumidores residenciais e industriais. A partir disso são realizados testes com o algoritmo descrito anteriormente. Em essência, os resultados demonstram que: quanto mais detalhada for a modelagem das cargas, mais precisos serão os resultados obtidos para a localização das faltas. A relevância desse conceito é moderada para a localização de faltas de baixa-impedância, já que a corrente das cargas torna-se muito pequena em comparação à corrente de falta.

Em (DAS et al., 2000) avanços importantes foram implementados para tornar a abordagem aplicável a alimentadores com derivações laterais. Isso foi obtido a partir do conceito de *sistema radial equivalente*. Como a impedância do alimentador é pequena em

comparação a das cargas, podem-se concentrar as cargas presentes em uma derivação lateral no ponto que as origina. Isso permite analisar o alimentador a partir de sistemas equivalentes semelhantes ao da figura 3.5 (com cargas intermediárias, mas sem representar explicitamente as derivações laterais).

Outros pontos que constituem contribuições do trabalho de DAS et al. (2000) são: a estimativa inicial da seção em falta (feita a partir da componente reativa da impedância), e a discussão a respeito das múltiplas estimativas que aparecem ao se considerar as derivações laterais. Os autores também propõem o emprego de detectores de faltas, que acusam a presença de faltas a jusante do ponto onde são instalados. Esses detectores devem ser estrategicamente alocados para que a conversão de múltiplas estimativas para uma única estimativa seja possível, para qualquer falta que venha a ocorrer no sistema.

3.2.3 OUTROS PROCEDIMENTOS

Além das duas abordagens descritas anteriormente, outras formulações importantes foram sugeridas para se obter a distância ao ponto de falta com base na análise do alimentador e na componente fundamental.

Em GIRGIS et al. (1993) é apresentada uma técnica de localização para alimentadores rurais. Emprega-se uma rotina de fluxo de potência para sistemas radiais, a fim de determinar as tensões e correntes ao longo do alimentador em falta até o início de cada seção onde a falta possa estar localizada, um procedimento que seria aplicado a novas ferramentas de uso em redes urbanas.

De acordo com isso, a metodologia de ZHU et al. (1997) se utiliza do mesmo princípio, sendo que os cálculos da distância ao ponto de falta, em uma dada seção do alimentador, consistem na solução iterativa das equações da rede em falta, estimando-se a corrente de falta e a corrente das cargas. Os modelos de carga de resposta estática,

descritos no Capítulo 2 são utilizados para a estimativa das correntes de cada uma das cargas, durante o processo iterativo.

Essa metodologia também integra uma série de informações disponíveis em determinadas estações de monitoramento de subestações, para complementar o módulo principal responsável pelos cálculos. No total, as seguintes etapas são processadas:

1. Um estágio de busca exaustiva para determinar todas as seções em falta possíveis, que possam corresponder às tensões e correntes medidas na subestação durante a falta;
2. Análise estatística para se determinar o erro esperado para cada valor de distância calculado, em função das incertezas nos parâmetros do modelo: dessa forma, ao final do processamento têm-se regiões prováveis da falta ter ocorrido e não exatamente a sua localização pontual, conforme ilustra a figura 3.6;
3. Utilização de informações provenientes do tempo de atuação e nível de corrente esperado de cada dispositivo de proteção, visando inferir qual fusível atuou para tentar eliminar respostas incoerentes;
4. Análise da variação do carregamento suprido ao alimentador após a atuação da proteção, também para auxiliar na filtragem de múltiplas localizações possíveis para a falta.

Essa metodologia sugere diversas possibilidades interessantes, porém sofre com a busca exaustiva das possíveis seções em falta (mesma limitação dos métodos do item anterior). Imagina-se um alimentador equivalente com mais de 150 pontos de carga: seria necessário efetuar uma análise baseada em fluxo de potência radial para cada seção do

mesmo, a fim de verificar se é possível da falta ter ocorrido dentro de seus limites, um procedimento exaustivo e complexo (dada ainda a inclusão dos modelos de resposta estática para estimar com maior precisão as correntes de cada carga).

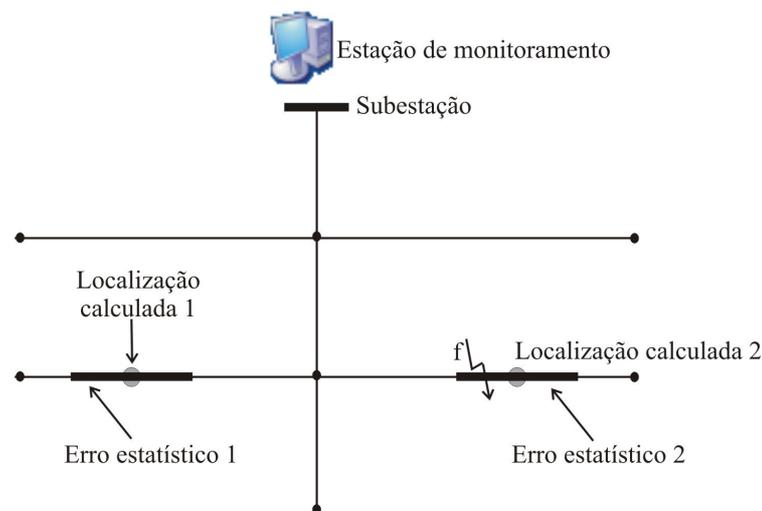


Figura 3.6 - Localizações Prováveis e Erros da Análise Estatística de Zhu et al. (1997).

Finalmente, se procede com a filtragem de localizações incoerentes. Nesse estágio, a utilização do tempo de atuação dos elos fusíveis como informação determinante pode levar à eliminação da estimativa correta, em casos onde os fusíveis estão mal coordenados ou foram alterados por alguma razão.

Mais recentemente, o método de LEE et al. (2004) também seguiu a linha de cálculo iterativo simultâneo da distância ao ponto de falta e do carregamento do sistema durante a falta. Ele reforça o grande número de métodos iterativos encontrados na literatura especializada, sugerindo a necessidade de métodos diretos que forneçam boas repostas, com menores requisitos de tempo de processamento e memória (condição desejável à aplicação em algoritmos de proteção), e menor complexidade no projeto de localizadores

de falta em alimentadores de grande porte.

Nesse contexto, a formulação apresentada em SANTOSO, et al. (2000) é aplicável para se determinar a distância a faltas envolvendo uma fase e a terra, sem a necessidade de execução de um processo iterativo. Embora esse seja o tipo mais comum de falta, conforme os próprios autores salientam, uma extensão do algoritmo para outros tipos de falta poderia ter sido sugerida. A formulação fornece também o valor da resistência de falta ao final dos cálculos, e se baseia no cálculo das componentes real e imaginária das equações do modelo do alimentador em falta, mas assume que a corrente das cargas é desprezível.

Os métodos descritos acima e publicações mais recentes, no Brasil (VALADÃO, 2005) e no exterior (CHOI et al., 2004), para localização de faltas via métodos analíticos e componentes fundamentais, têm seus resultados validados com de resistências de faltas inferiores a 50Ω . Isso evidencia que é preciso investigar o desempenho dessa abordagem para valores maiores da resistência de falta, e propor soluções em casos onde as respostas não forem satisfatórias.

3.3 MÉTODOS QUE EMPREGAM INFORMAÇÕES CONTIDAS NOS TRANSITÓRIOS DE FALTA

Quando ocorre uma falta em um alimentador, são originados sinais transitórios de alta-freqüência que aparecem sobrepostos à componente de freqüência fundamental nas formas de onda de tensão e corrente. Esses sinais são, na verdade, ondas viajantes que se propagam em velocidades próximas à velocidade da luz se refletindo nos extremos e descontinuidades do mesmo.

Uma forma de onda típica para tais casos pode ser observada na figura 3.7. As frequências não-harmônicas presentes nesse sinal a partir da ocorrência de uma falta no sistema (em $t = 30ms$). As ondas viajantes podem ser entendidas como frequências naturais de oscilação das capacitâncias e indutâncias do sistema elétrico, que aparecem quando ele é sujeito a uma mudança abrupta de estado (SILVEIRA, 2001). Por serem as fases elétricas de um sistema de potência mutuamente acopladas, a falta em uma fase provoca distúrbios também nas demais.

Os sinais transitórios constituem uma espécie de assinatura das faltas. Eles dependem do tipo e da localização das mesmas, do seu instante de incidência, e da configuração do sistema quando a falta ocorre. Diversos sistemas para diagnóstico de faltas em sistemas de distribuição vêm utilizando informações contidas nos transitórios de falta como dados de entrada.

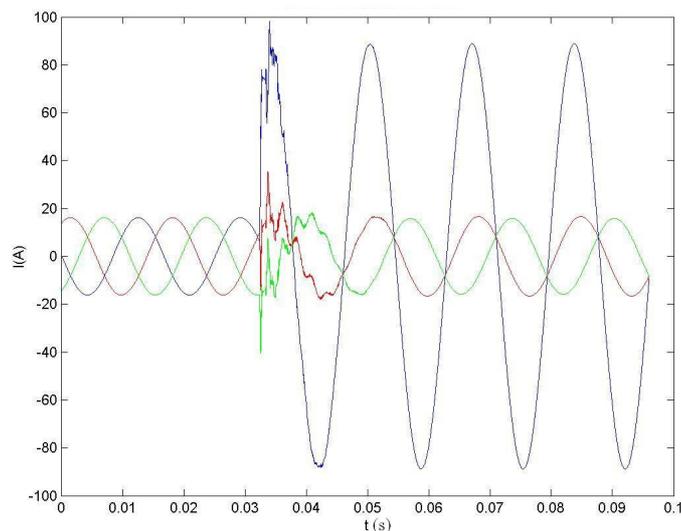


Figura 3.7 - Transitórios de Falta.

Embora os desenvolvimentos deste trabalho empreguem componentes

fundamentais de tensões e correntes, alguns métodos baseados nos transitórios de falta serão aqui descritos e analisados, em três categorias: ondas viajantes com dados de um único terminal, ondas viajantes com dados de dois terminais, e métodos que utilizam a transformada *wavelet*.

3.3.1 ONDAS VIAJANTES COM DADOS DE UM ÚNICO TERMINAL

A figura 3.8 pode ser empregada para ilustrar o princípio de funcionamento de métodos baseados em ondas viajantes que empregam dados de um único terminal: nesta figura é mostrada uma linha de fornecimento de energia de dois terminais (s e r) com uma falta no ponto f , localizado a uma distância d do terminal s .

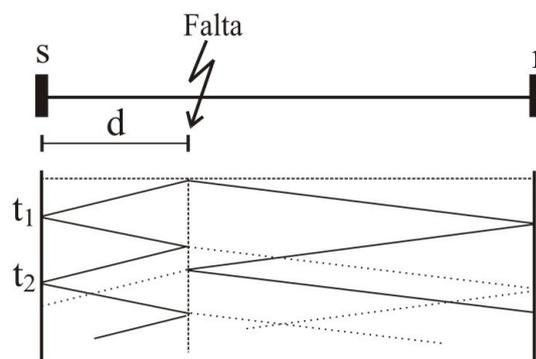


Figura 3.8 - Reflexão de Ondas Viajantes.

Considerando a unidade de aquisição instalada em s , a primeira onda viajante gerada pelo surto de falta chega a esse ponto no instante de tempo t_1 . No instante de tempo t_2 o sinal refletido na falta poderá ser novamente observado na unidade de aquisição. Dessa forma, a distância x pode ser obtida a partir de (3.5), onde vel é a velocidade de propagação das ondas no condutor.

O trabalho descrito em (BO et al., 1999) apresenta um método para localizar faltas

em redes de distribuição que utiliza o princípio das ondas viajantes. Os sinais utilizados são de alta-frequência, sobrepostos às formas de onda das tensões trifásicas, sendo obtidos utilizando técnicas de filtragem apropriadas. A polaridade desses sinais serve para distinguir reflexões que provém do ponto de falta daquelas que provém de derivações do alimentador.

$$d = \frac{(t_2 - t_1) \cdot vel}{2} \quad (3.5)$$

A unidade de aquisição e processamento dos sinais é instalada apenas em um terminal. Os sinais das três fases mutuamente acopladas são desacoplados matematicamente utilizando-se a matriz de transformação modal de *Clarke*, o que possibilita uma melhor análise dos transitórios para se identificar as fases faltosas.

Após testes iniciais utilizando um modelo de uma linha de dois terminais simples o método foi testado em um alimentador de distribuição com cargas alocadas ao longo do seu trajeto (não somente no seu extremo). A análise dos resultados dos referidos testes e da descrição do método demonstra bons resultados, mas a complexidade para implantação do sistema é maior que ao se utilizar componentes de frequência fundamental, e possui algumas limitações, a saber:

- As cargas alocadas ao longo do alimentador podem refletir as ondas viajantes de modo semelhante à falta, dependendo dos níveis de impedância de cada componente do sistema: no sistema-teste utilizado por BO et al. (1999) para a descrição do método, apenas três cargas alocadas ao longo do trajeto do alimentador são consideradas. A análise das reflexões dos sinais já se torna bastante complexa devido às múltiplas reflexões que aparecem. Em situações onde a rede possui inúmeras derivações laterais com cargas distribuídas, a

análise dos instantes de tempo de chegada das ondas de interesse para a localização da falta a partir de um único terminal pode se tornar ainda mais complexa;

- As ondas viajantes originadas por faltas que ocorrem muito próximas a um terminal do alimentador são difíceis de serem analisadas, pois as reflexões provenientes do ponto de falta praticamente se sobrepõem àquelas provenientes desse terminal;
- A localização de faltas em alimentadores que empregam diferentes tipos de condutores não é discutida na descrição apresentada, o que é uma tendência verificada na maioria dos trabalhos citados ao longo desta seção;
- As taxas de amostragem dos sinais, necessárias à análise dos transitórios, são bastante elevadas: 200 MHz no pior caso simulado pelos autores. Isso aumenta os requisitos do sistema com relação à necessidade de equipamentos mais complexos com maior capacidade de armazenamento e resposta temporal muito apurada, o que constitui um problema para os transformadores de instrumentos de medição convencionais (KEZUNOVIC et al., 2004).

3.3.2 ONDAS VIAJANTES COM DADOS DE DOIS OU MAIS TERMINAIS

As limitações dos métodos baseados em ondas viajantes baseados em um único terminal, evidentes em alimentadores de distribuição, motivaram pesquisas para contornar os inconvenientes citados anteriormente. O emprego de dados em dois terminais no alimentador principal é uma alternativa que vem sendo testada com sucesso.

Entre essas pesquisas, o trabalho de THOMAS et al., (2003) emprega funções de correlação cruzada que permitem localizar faltas em um sistema real com inúmeras

derivações laterais, a partir da instalação de unidades de aquisição nos dois extremos do alimentador principal com um bom grau de precisão. Dessa maneira, a energia proveniente das reflexões vindas do ponto de falta é maior que a das reflexões em derivações laterais, o que possibilita a distinção entre os dois eventos, e conseqüentemente a localização das faltas. A frequência de amostragem empregada é de 1,25 MHz, com resolução de 8 bits.

Ao se empregar dados de dois terminais, os métodos que empregam ondas viajantes têm uma excelente precisão e são menos influenciados pelo valor da resistência de falta e do carregamento do sistema. Entretanto, o custo de instalação do sistema tende a ser consideravelmente mais elevado em comparação a um sistema que empregue componentes fundamentais de tensões e correntes. Isso porque existe a necessidade de amostragem em taxas mais elevadas e sincronismo entre as unidades instaladas em cada terminal do alimentador.

Em NOURI et al. (2001) é descrita uma metodologia que emprega medições sincronizadas em todos os terminais do alimentador, porém, esse método emprega a transformada *wavelet*, e será descrito na seção dedicada a essa linha de pesquisa, a seguir.

3.3.3 O EMPREGO DA TRANSFORMADA WAVELET

A transformada *wavelet* (DAUBECHIES, 1997, KAISER 1994) permite obter informações precisas de quais as frequências envolvidas em um sinal para um dado instante de tempo. Se por um lado a análise de um sinal baseada na teoria de Fourier (OPPENHEIM, 1989) decompõe o sinal em variantes de senos e co-senos, na análise de um sinal via *wavelets*, o sinal é decomposto em variantes da função *wavelet-mãe* (*mother-wavelet*) determinadas por um coeficiente de escala, que possui forma semelhante ao gráfico mostrado na figura 3.9 (a).

Note-se que uma *wavelet* pode apresentar uma característica bastante aguda que

favorece a composição de sinais de altas frequências. *Funções-wavelets* com maior coeficiente de escala, como na figura 3.9 (b), possibilitam analisar porções de um dado sinal em frequências relativamente baixas. Funções com menor coeficiente de escala, como na figura 3.9 (c), possibilitam analisar o sinal em altas-frequências. Em linhas gerais, a análise via *wavelets* é a medida da correlação das *wavelets* de diferentes escalas deslocadas ao longo do sinal analisado no tempo.

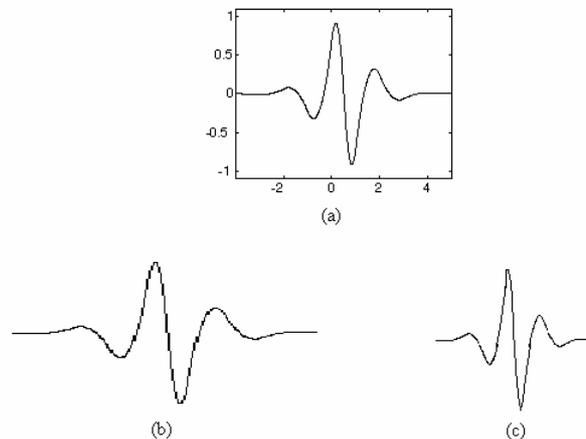


Figura 3.9 – Wavelets.

(a) Exemplo de função *wavelet-mãe*, (b) *Wavelet* com alto coeficiente de escala, (c) *Wavelet* com baixo coeficiente de escala.

Por conta da necessidade de analisar de forma precisa sinais de alta-frequência envolvidos em transitórios de faltas, a análise via *wavelets* vem sendo testada na localização de faltas em alimentadores de distribuição. Inclusive, alguns dos primeiros trabalhos a empregar a *transformada wavelet* para diagnóstico de faltas incluindo a detecção de faltas de alta-impedância por análise do conteúdo em altas-frequências, em redes elétricas foram desenvolvidos nesse contexto, são exemplos os trabalhos de

CHAARI et al. (1996), ASSEF et al. (1996), e WAY et al. (1998).

Em (NOURI et al., 2001) os autores descrevem uma ferramenta que supõe a instalação de sensores que detectam transitórios de falta em todos os terminais do alimentador, conforme mostra a figura 3.10.

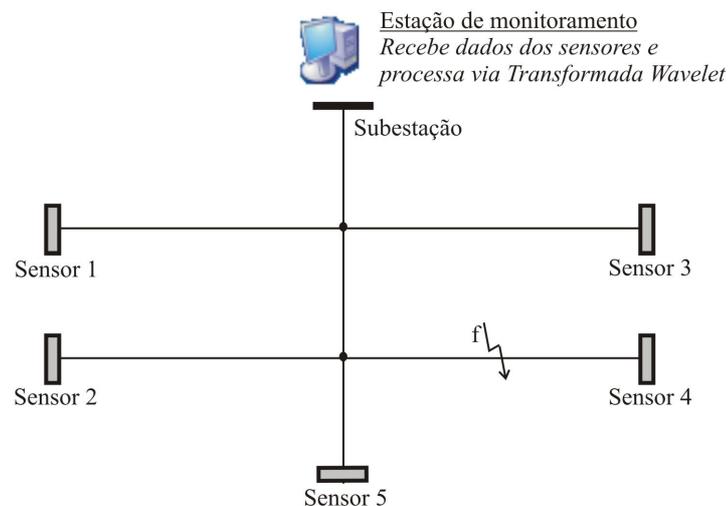


Figura 3.10 - Proposta de Nouri et al. (2001).

Tais unidades possuem uma base de tempo comum que emprega um sistema GPS (*Global Positioning System*) para sincronismo. As informações de todos os sensores são transmitidas para a central de monitoramento na subestação. A análise dos tempos de chegada das ondas viajantes às diferentes unidades de aquisição na ocorrência de uma falta determina a localização da mesma. O emprego dos filtros *wavelet* possibilita obter uma boa precisão nos resultados.

Entretanto, é fácil perceber que a ferramenta descrita acima possui duas limitações relevantes: necessidade de coordenação altamente precisa entre os sensores e, principalmente, o seu *custo elevado*.

3.4 METODOLOGIAS QUE EMPREGAM REDES NEURAIAS

O emprego de técnicas de inteligência artificial para o diagnóstico de faltas em sistemas de distribuição inclui uma variedade de técnicas. Sistemas especialistas são empregados há muitos anos para processar diversas fontes de informações que possam levar ao local da falta (MONTKAHAB et al., 1998). No Brasil, o sistema de PEREIRA et al. (2004) vem empregando com sucesso a *lógica difusa* para determinar a seção em falta de alimentadores.

Entretanto, são as redes neurais artificiais a técnica mais empregada, e objeto de parte dos desenvolvimentos do trabalho objeto desta tese.

Metodologias para resolver problemas na área de sistemas elétricos de potência empregando redes neurais têm sido propostas com base na habilidade dessa técnica para obter soluções em situações cujo mapeamento entrada/saída é complexo e difícil de determinar analiticamente.

As redes neurais têm figurado, há algum tempo, como técnica de proteção de sistemas elétricos devido a sua característica adaptativa (SIDHU et al., 1995, DALSTEIN et al., 1996). Devido às mudanças de configuração dos sistemas elétricos, os métodos convencionais podem levar a erros de tomada de decisão por não determinar corretamente o mapeamento entrada/saída do problema.

Nas aplicações em proteção, técnicas de pré-processamento dos fasores de tensão e corrente devem ser aplicadas para extração dos padrões de entrada da rede neural. COURY et al. (1998), por exemplo, empregam a transformada discreta de Fourier com janela de $\frac{1}{2}$ ciclo nesse estágio.

Seguindo a tendência dos algoritmos de proteção, a localização de faltas também

passou a figurar entre as aplicações mais conhecidas de redes neurais em sistemas elétricos (AGGARWAL et al., 1998b). Os dados de entrada podem ser somente componentes de frequência fundamental (MOHAMED et al., 1996), incluir componentes harmônicas (MORETO et al., 2004) ou combinações quaisquer entre as variáveis que caracterizem o mapeamento entrada/saída estudado.

A maior parte das técnicas desenvolvidas para alimentadores de distribuição emprega um modelo do sistema estudado, onde são simulados casos de faltas que servem de base para o treinamento. Posteriormente, na aplicação “em campo”, espera-se que as redes treinadas informem com boa exatidão a localização, ou outras informações de interesse sobre faltas não incluídas no treinamento.

A utilização de dados simulados se deve ao fato de, na maioria dos casos, não se dispor de um histórico de ocorrências reais satisfatório para treinar as redes e permitir a obtenção de bons resultados a qualquer nova ocorrência, o que é tido como um inconveniente dessa técnica (ZHU et al., 1997).

O trabalho de MOHAMED et al., (1995) descreve o emprego de redes neurais para um diagnóstico bastante abrangente (detecção, identificação das fases faltosas e determinação da seção em falta) de faltas em alimentadores. A figura 3.11 mostra os principais componentes da ferramenta desenvolvida pelos autores. São utilizadas quatro redes neurais treinadas de forma independente para realizar o diagnóstico em etapas.

A primeira rede neural tem a função de detecção de faltas. A segunda é empregada para a determinação da seção em falta, sendo este o único estágio responsável pela localização das faltas. A terceira e quarta têm respectivamente as funções de discriminarem faltas de alta-impedância e identificar as fases envolvidas nas faltas de baixa-impedância.

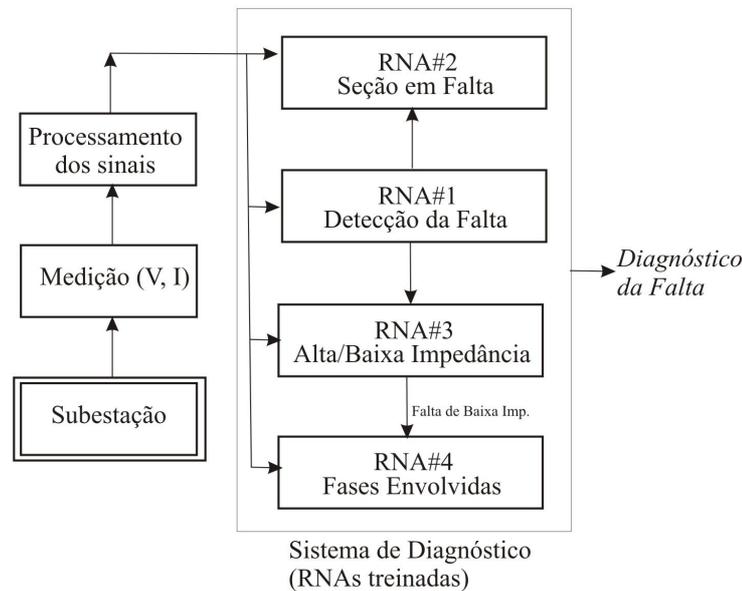


Figura 3.11 - Diagrama Ilustrativo da Ferramenta de Mohamed et al. (1995).

Os resultados mostram um elevado percentual de acerto na validação em um sistema de pequeno porte (um alimentador de três seções ligando uma subestação a uma carga). O conjunto total de treinamento, composto por 1075 padrões, inclui condições normais de operação e diversas possibilidades de faltas no sistema. Os dados de entrada são medições de tensão e corrente na subestação (das quais são obtidas as componentes fundamentais).

No trabalho de CHOW et al. (1993) são empregadas redes neurais para identificar faltas causadas por contatos de animais em sistemas de distribuição. O conhecimento da causa dos defeitos que ocorrem em um sistema de distribuição auxilia na tomada de providências para evitar novas ocorrências.

O trabalho de GLINKOWSKI et al. (1995) emprega a idéia de reconhecimento de padrões via redes neurais para a localização de faltas em redes de distribuição com cabos subterrâneos, salientando a dificuldade de se localizar faltas nesse contexto. As variáveis

de entrada da rede neural são magnitudes de tensões e correntes (componentes fundamentais) obtidas a partir de dispositivos de proteção instalados ao longo do sistema. As saídas são vetores binários onde os dígitos correspondem às posições onde o sistema possui aberturas de acesso à rede subterrânea. As redes neurais identificam qual a abertura mais próxima da falta para que a equipe de manutenção responsável acesse o ponto do defeito.

Em BRETAS et al., (2001) são analisados os possíveis impactos da geração distribuída no problema de diagnóstico de faltas em redes de distribuição. O emprego de redes neurais multicamadas com o algoritmo de aprendizado via retropropagação de erro é proposto para a obtenção de soluções nesse contexto. Redes neurais dessa categoria são empregadas na quase totalidade dos trabalhos para diagnóstico de faltas em alimentadores. Tal fato sugere a necessidade de se investigar novas arquiteturas e seu desempenho na problemática em questão, embora se reconheça a adequação das redes neurais daquele tipo ao problema devido aos bons resultados que já foram obtidos e às características da mesma.

Em SOUZA MARTINS et al. (2003) é proposto um método onde apenas sinais de corrente são utilizados como dados de entrada ao processamento (via matriz de transformação de *Clarke-Concordia*) e posterior diagnóstico de faltas via redes neurais. Os autores salientam a vantagem de que apenas transformadores de corrente são necessários nesse caso, o que reduz os custos para a implementação do método.

Em MORETO et al. (2004) é proposto um conjunto de dados de entrada diferenciado para extrair as características do problema em uma ampla gama de impedâncias de falta. No estágio de localização de faltas, se utilizam as componentes fundamentais de tensões e correntes para faltas de baixa impedância, e a magnitude da

terceira harmônica de corrente, juntamente com a defasagem dessa para a fundamental da tensão para faltas de alta impedância. Os resultados em um alimentador de 67 nós, sem derivações laterais, são promissores.

Completando a análise feita acima, é importante ressaltar algumas limitações nas metodologias baseadas em redes neurais para diagnóstico e localização de faltas em alimentadores:

- Os conjuntos de treinamento são compostos por um montante de dados muito grande para sistemas-testes de magnitudes reduzidas, na maioria dos casos;
- A localização pontual da falta não é fornecida ao final do diagnóstico, apenas a *seção em falta* é comumente adotada como variável de saída;
- Não são feitas as devidas considerações sobre derivações laterais presentes em alimentadores e sua implicação no treinamento e validação das redes neurais;
- Não são comuns estudos de sensibilidade dos resultados a variações do modelo empregado para o treinamento, com relação ao estado real do sistema;
- Não se discute o problema das múltiplas estimativas para a localização das faltas, que certamente podem aparecer em um alimentadores com derivações laterais;
- Limitações das técnicas baseadas em redes neurais frente a mudanças de topologia e carregamento dos sistemas não são discutidas na maioria dos trabalhos pesquisados.

Mesmo considerando essas limitações a abordagem via redes neurais possui características interessantes ao problema, como o relativo baixo custo de implementação e a possibilidade de obtenção de soluções em casos onde os métodos analíticos não

apresentam boa precisão. Faltas de alta-impedância constituem exemplos de tais situações (conforme será abordado em capítulos posteriores).

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Métodos que vêm sendo aplicados para localização de faltas em alimentadores de distribuição foram descritos e analisados neste capítulo. Podem-se dividir os métodos em três grupos principais que refletem diferentes tendências nos desenvolvimentos.

Os métodos baseados na componente fundamental se destacam pelo seu grande interesse prático. Métodos que utilizam informações contidas nos transitórios de falta possuem boa precisão e baixa influência do valor da resistência de falta. A abordagem que emprega redes neurais surge como uma alternativa em situações onde os demais métodos apresentam dificuldades na obtenção de soluções, devido à complexidade do mapeamento entrada/saída do problema.

Diversas limitações foram apuradas nos métodos analíticos que empregam a componente fundamental. Elas serão novamente discutidas ao se propor 2 novos métodos no Capítulo 5.

Também foram verificados pontos a ser melhorados e discutidos para o emprego de redes neurais no problema estudado. Tais pontos também serão abordados ao se propor uma nova metodologia nessa linha, no Capítulo 6.

O próximo capítulo inicia a descrição de procedimentos necessários ao processo de localização de faltas com os métodos que serão descritos posteriormente.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTOS COMUNS AOS NOVOS MÉTODOS PROPOSTOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo aborda dois pontos principais: o primeiro é definir procedimentos importantes para a modelagem de alimentadores. O segundo é descrever funções anteriores à localização de uma falta, incluindo a aquisição das variáveis de interesse, detecção e identificação das fases faltosas e avaliação da ordem de grandeza da resistência de falta.

Todos os conceitos apresentados são necessários para os 3 métodos a serem propostos nos capítulos seguintes.

4.2 MODELAGEM DE ALIMENTADORES

4.2.1 RELAÇÕES ENTRE TENSÕES E CORRENTES

O fato dos alimentadores de distribuição serem não-transpostos e desequilibrados tem grandes implicações na determinação das suas relações entre tensões e correntes. Esses aspectos podem ser melhor analisados a partir da impedância série dos mesmos. Aspectos referentes à capacitância em derivação das seções de um alimentador não serão detalhados, pela baixa influência desse parâmetro no processo de localização de faltas e análise de linhas de distribuição curtas (STEVENSON, 1975).

A figura 4.1 mostra um segmento de um alimentador trifásico, indicando

impedâncias próprias e mútuas entre as fases. O cálculo das impedâncias próprias e mútuas entre os diversos condutores é feito através das características físicas dos condutores das fases e do neutro, fornecidas pelos fabricantes, e do espaçamento entre os mesmos que deve ser do conhecimento da empresa distribuidora, empregando-se equações disponíveis em diversos livros e catálogos.

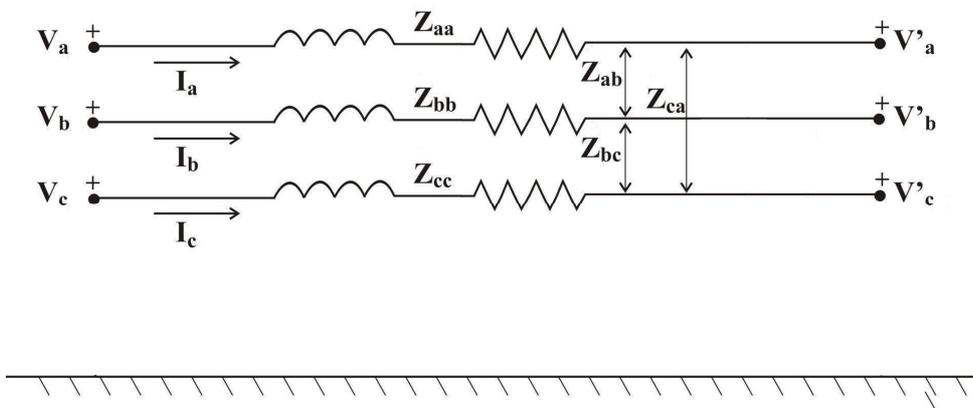


Figura 4.1 - Impedâncias Mútuas e Próprias de um Segmento de Alimentador.

Para o circuito equivalente da Figura 4.1, pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} V'_a \\ V'_b \\ V'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

A matriz de impedâncias que aparece na equação 4.1, possui algumas propriedades importantes (SCOTT-MEYER, 1992):

- Simetria: os elementos não diagonais em posições simétricas (como Z_{ab} e Z_{ba}) são iguais entre si;
- Em linhas de fornecimento de energia não-transpostas, como alimentadores de

distribuição, os elementos diagonais diferem entre si, o que também é verdade para os elementos fora da diagonal;

- Em linhas transpostas os elementos diagonais são iguais e os elementos não diagonais também, como na matriz em (4.2). Os subscritos p e m são usados para se referir às impedâncias próprias e mútuas de cada fase:

$$\mathbf{Z}_{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_p & \mathbf{Z}_m & \mathbf{Z}_m \\ \mathbf{Z}_m & \mathbf{Z}_p & \mathbf{Z}_m \\ \mathbf{Z}_m & \mathbf{Z}_m & \mathbf{Z}_p \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

- Podem-se definir as impedâncias de seqüência positiva, negativa e zero (\mathbf{Z}_0 , \mathbf{Z}_1 , \mathbf{Z}_2) em função dos elementos da matriz impedância de fase, sem acoplamentos mútuos entre as seqüências, de acordo com as equações (4.3) e (4.4):

$$\mathbf{Z}_0 = \mathbf{Z}_p + 2.\mathbf{Z}_m \quad (4.3)$$

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_2 = \mathbf{Z}_p - \mathbf{Z}_m \quad (4.4)$$

Em alimentadores não-transpostos, pode-se obter um modelo *transposto-equivalente*, para posteriormente se utilizar as equações (4.3) e (4.4) e se valer da análise desacoplada em modos independentes de seqüências positiva, negativa, e zero. Para isso, igualam-se os elementos diagonais e não-diagonais da matriz de impedância de fase à média dos elementos, de acordo com as equações (4.5) e (4.6).

$$\mathbf{Z}_p = \frac{1}{3} . (\mathbf{Z}_{aa} + \mathbf{Z}_{bb} + \mathbf{Z}_{cc}) \quad (4.5)$$

$$\mathbf{Z}_m = \frac{1}{3} . (\mathbf{Z}_{ab} + \mathbf{Z}_{bc} + \mathbf{Z}_{ca}) \quad (4.6)$$

Assumir a transposição equivalente do alimentador gera alguns erros que podem ou não ser relevantes, dependendo do tipo de análise que se deseja fazer. Entretanto, é preciso

fornecer esse procedimento para ser aplicado em formulações para localização de faltas baseadas em circuitos de seqüência positiva, negativa, e zero.

4.2.2 ALOCAÇÃO DE CARGAS

Em alimentadores, de um modo geral, não dispõem de medições *on-line* da potência suprida a cada ponto de carga atendido pelos transformadores de distribuição. A fim de implementar rotinas de análise e modelos de alimentadores é preciso estimar a carga suprida a cada transformador.

O emprego de métodos estatísticos com essa finalidade é discutido em (KERSTING, 2002), onde também é sugerida uma forma mais simples, que fornece, entretanto bons resultados: a alocação de cargas com base na potência nominal de cada transformador. Essa técnica consiste dos seguintes passos:

1. Cálculo do *fator de alocação* (FA), que é dado pela razão da potência total suprida ao alimentador, pelo somatório das potências nominais de todos os transformadores conectados ao mesmo (ambas em kVA), de acordo com (4.7):

$$FA = \frac{|S_m|}{|S_{total}|} \quad (4.7)$$

Onde: S_m = Potência total medida (kVA);

S_{total} = Somatório das potências nominais dos transformadores de distribuição (kVA).

2. Alocação das cargas para cada transformador, a partir da equação 4.8:

$$S_i = FA.S_{nom}^i \quad (4.8)$$

Onde: S_i = Estimativa da potência suprida ao transformador i (kVA);

FA = Fator de Alocação;

$$S_{nom}^i = \text{Potência nominal do transformador } i \text{ (kVA)}.$$

Ao se utilizar esse método para alocação de cargas, o fator de potência atribuído a todos os transformadores é igual àquele medido na subestação.

Na definição de um modelo para o alimentador, valores de impedâncias equivalentes às cargas podem ser obtidos em função da potência estimada e da tensão nominal em cada ponto de carga. A representação de cargas por impedâncias constantes despreza, entretanto, os efeitos de variações das cargas em função da tensão nos seus terminais, mas é um modelo satisfatório para estudos de transitórios de falta e análise aproximada em regime permanente do alimentador.

4.3 ESTÁGIOS INICIAIS DO PROCESSO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Após definir os elementos mais importantes para a modelagem de um alimentador, serão abordados os primeiros estágios de um processo de localização de faltas com base na componente fundamental.

4.3.1 EXTRAÇÃO DA COMPONENTE FUNDAMENTAL

Conforme mencionado no Capítulo 3, ao ocorrer uma falta em um sistema elétrico de potência, sinais transitórios de alta-freqüência aparecem nas formas de onda das tensões e correntes nas três fases. Esses sinais são indesejáveis quando se pretende fazer um diagnóstico da falta com base na componente fundamental. É necessário filtrar os sinais de alta-freqüência obtendo-se uma estimativa da componente fundamental, como mostrado na figura 4.2.

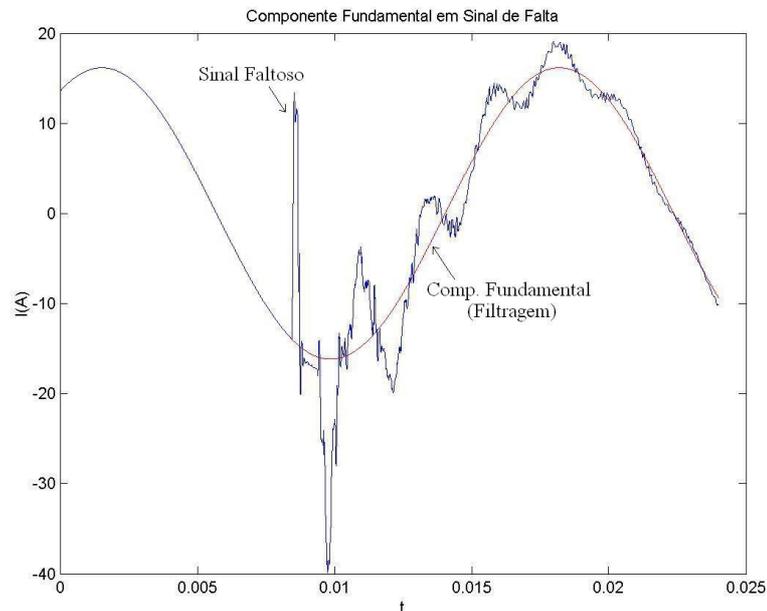


Figura 4.2 - Filtragem da Componente Fundamental de um Sinal Faltoso.

Existem diversos algoritmos com essa finalidade, estando entre os mais populares aqueles baseados na teoria de Fourier (*transformada discreta de Fourier*, de ciclo completo e $\frac{1}{2}$ ciclo). A teoria e os meios para implementação dessas técnicas em relés e localizadores digitais de faltas são detalhados em livros da área de proteção digital (JOHNS et al., 1995, PHADKE et al., 1988).

Neste trabalho foi escolhida, como técnica de extração da componente fundamental, outra metodologia bastante popular: o algoritmo dos mínimos quadrados (LUCKETT et al., 1975, SACHDEV et al., 1979). A descrição completa deste algoritmo é fornecida no *Anexo A*.

O algoritmo dos mínimos quadrados foi implementado e testado em simulações do primeiro alimentador-teste empregado, com dados detalhados apresentados no *Anexo B*. O objetivo dos primeiros testes realizados foi observar a capacidade de filtragem de componentes harmônicas; analisar se a quantidade de amostras do sinal utilizada era

satisfatória; se os erros esperados na obtenção da estimativa dos fasores de tensões e correntes seriam satisfatórios ao processo de localização de faltas.

Para tanto, adotou-se o seguinte ajuste de parâmetros:

- *Taxa de amostragem:* 2 kHz, aproximadamente 32 amostras por ciclo em uma onda de 60 Hz;
- *Janela de tempo:* $\frac{1}{2}$ ciclo, para a taxa de amostragem especificada os fasores são estimados utilizando sempre um conjunto de 16 amostras. *O tamanho da janela de tempo pode ser aumentado em uma aplicação em campo, dependendo do ajuste da proteção empregado para o alimentador.* O critério da janela de $\frac{1}{2}$ ciclo adotado aqui é bastante conservador, a fim de avaliar a eficiência do algoritmo nesse cenário.

4.3.1.1 Metodologia para Análise de Exatidão

A metodologia abaixo tem sido empregada ao longo do trabalho para verificar o correto funcionamento do módulo computacional que fornece os fasores de tensão e corrente aos programas computacionais integrados para localização de faltas.

Inicialmente, a rede elétrica com uma resistência de falta conectada no ponto onde o defeito será simulado é modelada no programa ATP (*Alternative Transient Program*) (SCOTT-MEYER, 1992), em regime permanente. O programa calcula então o estado da rede, através da regra trapezoidal de integração nas suas equações diferenciais. Esse será considerado o estado “correto”, e servirá como parâmetro para avaliar se os fasores, posteriormente estimados levando em conta os sinais transitórios de falta, vão estar de acordo com esse estado.

O mesmo procedimento é adotado para se determinar o estado da rede antes da

falta. Nesse caso, não é inserida, obviamente, a resistência de falta.

Após a obtenção do estado da rede em cada período de interesse, o sistema é novamente analisado, incluindo um modelo de falta que consiste no chaveamento da resistência de falta, simulando a ocorrência do curto-circuito. Isso irá fazer com que o ATP determine não somente a componente fundamental, mas também os sinais transitórios de falta provenientes das ondas viajantes nos sinais de tensão e corrente, permitindo o emprego e avaliação da técnica de filtragem em questão através da comparação com a análise em regime permanente feita anteriormente.

Para demonstrar a metodologia, as formas de onda de corrente da figura 4.3 serão analisadas. A resistência de falta é de 500Ω (falta de alta-impedância), e a falta foi simulada no nó 4 do alimentador-teste operando inicialmente a 50% da potência total instalada (ver Anexo B).

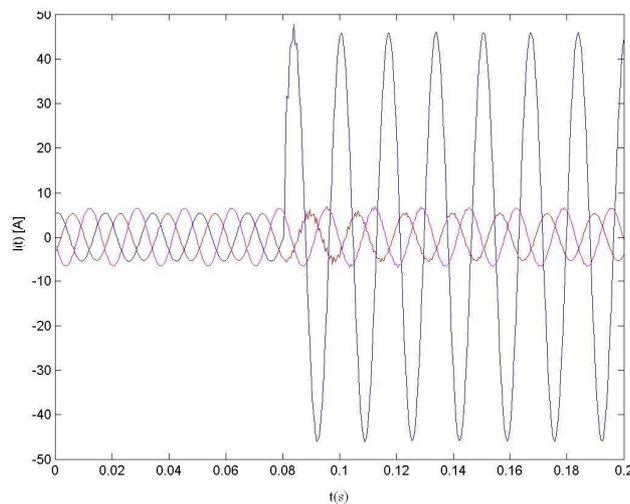


Figura 4.3 - Formas de Onda para Demonstração do Algoritmo dos Mínimos Quadrados.

Na figura 4.3, pode-se notar a incidência da falta no instante $t = 80ms$, em uma das fases (fase *a*) evidenciada pelo aumento súbito na amplitude da corrente. Sinais transitórios

associados à ocorrência do surto, a serem filtrados, também estão claros na figura, principalmente nas fases não envolvidas na falta por indução propagada através dos acoplamentos mútuos.

Os valores tidos como corretos para o estado do alimentador, antes e durante a falta, fornecidos pelo ATP, são dados na tabela 4.1. A referência do sistema é a tensão na fase *a*. O passo de integração do ATP para o cálculo das correntes é de 0,5 ms.

Tabela 4.1 - Valores para Posterior Avaliação dos Erros de Filtragem.

<i>Período</i>	$ I_a $ (A)	Ângulo (I_a) ($^\circ$)	$ I_b $ (A)	Ângulo (I_b) ($^\circ$)	$ I_c $ (A)	Ângulo (I_c) ($^\circ$)
Pré-falta	5,53	-11,00	5,37	-125,41	6,60	106,95
“Em falta”	45,98	-2,21	5,38	-125,52	6,60	107,08

Os resultados para a estimação dos fasores, através do algoritmo dos mínimos quadrados, a uma taxa de amostragem de 2 kHz e janela de $\frac{1}{2}$ ciclo, são mostrados nas tabelas a seguir. A tabela 4.2 traz a estimativa dos fasores no período pré-falta, que apresentam erros mínimos devido à ausência de sinais transitórios.

Tabela 4.2 - Estimativas dos Fasores Obtidas no Período Pré-Falta.

	I_a (A)	Ângulo (I_a) (<i>graus</i>)	I_b (A)	Ângulo (I_b) (<i>graus</i>)	I_c (A)	Ângulo (I_c) (<i>graus</i>)
Valor obtido	5,52	-10,98	5,36	-125,36	6,59	-106,99
Erro (%)	-0,19	-0,14	-0,20	-0,04	-0,16	0,03

As formas de onda de corrente após a incidência da falta (em $t = 80ms$) são

detalhadas nas figuras 4.4 (a), (b) e (c). A corrente na fase a , mostrada na figura 4.4 (a), possui uma distorção elevada no primeiro $\frac{1}{2}$ ciclo após a incidência da falta, que tem seu efeito reduzido posteriormente. A corrente na fase b , mostrada na figura 4.4 (b), apresenta maior distorção. A corrente na fase c também apresenta um conteúdo harmônico apreciável no intervalo mostrado, conforme a figura 4.4 (c).

Se os fasores forem estimados utilizando os dados adquiridos no primeiro $\frac{1}{2}$ ciclo após a incidência da falta, os erros obtidos podem se tornar elevados, devido à grande influência dos sinais transitórios, conforme mostrado na tabela 4.3. Pode-se notar um erro de 8,43% na estimativa do ângulo da corrente I_a e um erro de 0,91% na estimativa da magnitude da corrente I_b .

Tabela 4.3 - Estimativas dos Fasores Obtidas no Primeiro $\frac{1}{2}$ Ciclo do Período “em Falta”.

	$ I_a $ (A)	Ângulo (I_a) (graus)	$ I_b $ (A)	Ângulo (I_b) (graus)	$ I_c $ (A)	Ângulo (I_c) (graus)
Valor obtido	45,92	-2,39	5,43	-125,23	6,59	107,08
Erro (%)	-0,13	8,43	0,91	-0,22	-0,17	0,01

Finalmente, na tabela 4.4, estão estimativas obtidas 3 ciclos após a detecção da falta. Pode-se verificar que é possível se obter uma estimativa com erros inferiores a 0,27%, mesmo na presença dos sinais transitórios de falta bastante evidentes.

Constitui um procedimento usual estimar variáveis do período “em falta” para alimentadores com um atraso de dois ou três ciclos após a incidência da mesma, antes, porém que a proteção do alimentador atue (DAS, 1998). O tempo de atuação de religadores normalmente é da ordem de segundos após a ocorrência da falta, o que favorece a adoção desse procedimento.

Análise dos erros das tabelas anteriores fez concluir que a precisão das estimativas dos fasores pode ser considerada bastante satisfatória para se iniciar os testes do processo de diagnóstico de faltas.

Tabela 4.4 - Estimativas dos Fasores Obtidas 3 Ciclos após a Detecção da Falta.

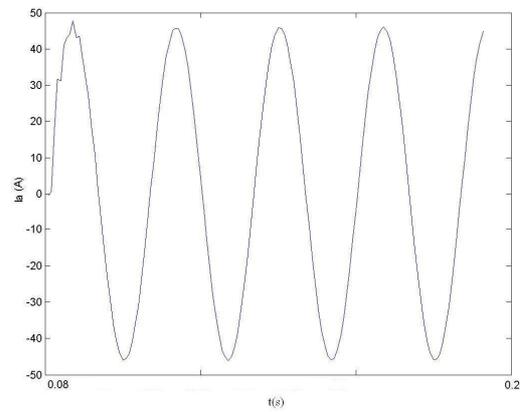
	$ I_a $ (A)	Ângulo (I_a) (graus)	$ I_b $ (A)	Ângulo (I_b) (graus)	$ I_c $ (A)	Ângulo (I_c) (graus)
Valor obtido	45,98	-2,20	5,37	-125,34	6,58	107,08
Erro (%)	-0,01	-0,20	-0,23	-0,14	-0,27	0,01

4.3.2 DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE FALTAS

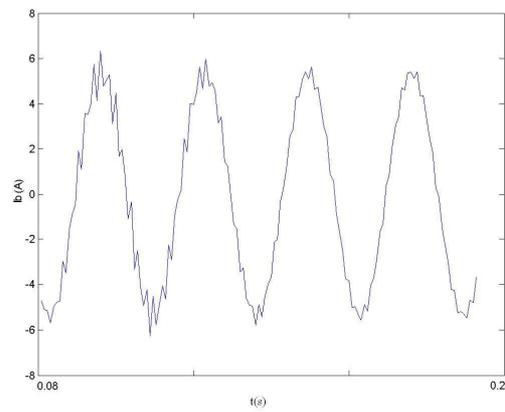
Para se de distinguir o estado normal do alimentador daquele em falta é preciso detectar o evento, armazenando as amostras das variáveis necessárias ao processo de localização do defeito. Para tanto, será adotado o seguinte procedimento.

- O algoritmo de extração das componentes fundamentais das correntes e tensões nas três fases é processado, continuamente, sobre o intervalo de dados analisado. Nesse estágio, se alguma das correntes, em qualquer fase, se tornar superior em magnitude a um limiar ξ , assume-se a condição de falta do ponto de vista da ferramenta de localização, e iniciam-se os cálculos posteriores.

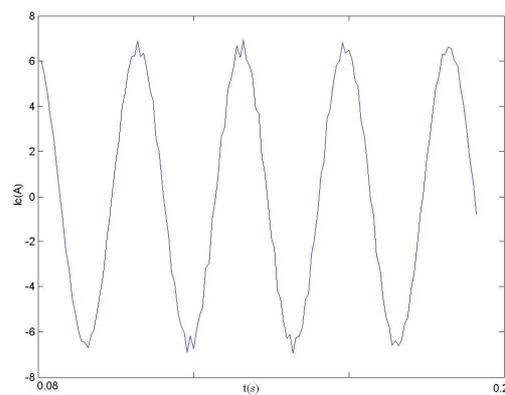
O valor de ξ depende do sistema estudado e da sensibilidade desejada. Será adotado um valor igual a duas vezes a magnitude da corrente em cada fase do alimentador, em operação normal (uma regra heurística).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.4 - (a) Corrente na Fase *a* Durante a Falta. (b) Corrente na Fase *b* Durante a Falta.
(c) Corrente na Fase *c* Durante a Falta.

O procedimento para detecção de faltas descrito acima é comumente empregado em práticas de ajuste de equipamentos de proteção em distribuidoras. Porém, a detecção de faltas de alta-impedância em alimentadores é um problema que requer tratamento diferenciado, tal como aquele dado por técnicas de detecção via transformada *Wavelet* e redes neurais com componentes harmônicas, assuntos já abordado no Capítulo 3.

A partir da detecção da falta, devem-se armazenar os fasores das tensões e correntes durante a falta estimados em três ciclos após essa condição ter sido verificada, de acordo com o procedimento discutido anteriormente. Posteriormente, novos testes de comparação com os valores das correntes antes da falta (para as três fases) servem para identificar as fases faltosas. Faltas envolvendo a terra provocam um aumento na corrente de seqüência zero, definida em (4.9).

$$I_o = \frac{(I_a + I_b + I_c)}{3} \quad (4.9)$$

Será adotada, para a corrente de seqüência zero, a mesma regra heurística válida para detectar a condição de falta em uma das fases (se o valor exceder duas vezes o verificado antes da falta, assume-se que a falta envolve a terra).

Os fasores estimados no período pré-falta e aqueles estimados após o tempo de atuação da proteção (que depende do sistema estudado), também devem ser armazenados para a continuação do processo de localização de faltas e posterior análise de variação da carga suprida pelo alimentador.

4.3.3 ORDEM DE GRANDEZA DA RESISTÊNCIA DE FALTA

Como a precisão dos métodos analíticos para localização de faltas baseados na componente fundamental é altamente influenciada pela resistência de falta, sugere-se

avaliar a sua ordem de grandeza antes de iniciar o processo de localização, de modo a escolher o método mais adequado para essa tarefa em um determinado alimentador.

Pode-se fazer essa avaliação através da equação (4.10) que supõe a medição das variáveis na subestação. A tensão V_{fi} , medida na fase faltosa i , é dividida pela estimativa da corrente de falta I_{fi} , que é dada pela diferença entre os valores de corrente medidos durante e antes da falta (de modo a descontar a corrente suprida às cargas do sistema).

O valor obtido através da equação (4.10) serve apenas para definir se as resistências associadas a uma falta estão acima ou abaixo de um determinado limite (não possui exatidão apurada).

$$o(R_f) = \left(\frac{V_{fi}}{I_{fi}} \right) \quad (4.10)$$

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os procedimentos para modelagem de alimentadores que foram descritos na Seção 4.2 são importantes para simulações visando obter dados para testes dos métodos de localização de faltas, e para a definição das equações nos métodos analíticos que serão propostos.

Foram apresentados, na Seção 4.3, procedimentos necessários ao processo de localização de faltas: detecção, identificação das fases faltosas e avaliação da ordem de grandeza da resistência de falta (que pode ajudar a determinar qual o método de localização mais adequado).

No próximo capítulo serão propostos dois métodos analíticos para localização de faltas de baixa-impedância.

CAPÍTULO 5

OS MÉTODOS ANALÍTICOS PROPOSTOS PARA FALTAS DE BAIXA-IMPEDÂNCIA

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Métodos analíticos existentes para localização de faltas baseados na componente fundamental foram analisados no Capítulo 3. Diversas limitações importantes foram apontadas, motivando a pesquisa por novas formulações e melhorias nas existentes.

Os métodos dessa categoria são adequados à localização de faltas cuja impedância não excede algumas dezenas de Ohms, devido principalmente a não se dispor das medidas precisas de potência suprida a cada ponto de carga do alimentador. Tanto que, para faltas de alta-impedância será proposto um método baseado em redes neurais no próximo capítulo, procedimento motivado justamente por esse fato (COSER et al., 2004b).

Neste capítulo são propostos dois métodos analíticos: um direto e outro iterativo, identificados por *método 1* e *método 2*. Dessa forma, se possibilita mais de uma alternativa para empresas e pesquisadores que desejem testar as técnicas.

5.2 ALIMENTADOR EQUIVALENTE SIMPLIFICADO NÃO-HOMOGÊNEO

Nos dois métodos será utilizado o conceito de alimentador equivalente simplificado não-homogêneo.

A figura 5.1 ilustra um pequeno alimentador com uma falta no ponto f . A

representação unifilar está sendo adotada. O segmento em falta é a expansão lateral que se origina no ponto r e termina no ponto l . Os diferentes estilos nos traços do diagrama servem para diferenciar trechos com diferentes características de impedância. Basicamente, o tronco principal do alimentador é constituído por um tipo de condutor, e as derivações laterais por outro.

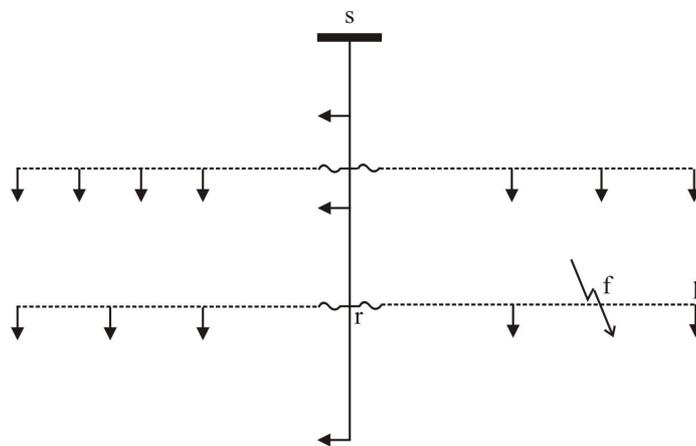


Figura 5.1 - Alimentador com Falta em f .

Para simplificar as descrições posteriores, esse exemplo será empregado ao longo de toda a descrição dos métodos. Posteriormente serão derivados os procedimentos a outros casos e feitas considerações adicionais devidas.

É possível representar um segmento de alimentador com cargas distribuídas no seu trajeto utilizando um modelo simplificado que concentra a carga total em um único ponto. Esse procedimento é comum na análise rápida de queda de tensão e perdas em segmentos de alimentadores.

Partindo desse princípio, o alimentador em falta acima poderia ser representado através de um equivalente de dois terminais, porém não-homogêneo, como mostrado na

figura 5.2. As diferentes características de impedância que compõe o trajeto da subestação até o final do segmento em falta são mantidas (COSER et al., 2005a). As variáveis V_s e I_s são as tensões e correntes medidas na subestação durante a falta.

Os nós s , l , r e os segmentos que os conectam são exatamente aqueles do alimentador original, os demais nós foram eliminados e toda a carga suprida no período *pré-falta* é concentrada no extremo l . O comprimento do trecho $s-r$ e a distância do ponto r até o ponto de falta são identificados por x e d , respectivamente.

Para os cálculos da distância ao ponto de falta utilizando os métodos descritos a seguir, deve-se adotar o equivalente em estrela do alimentador. A carga equivalente de cada fase deve ser conectada entre a fase e a terra, no equivalente de dois terminais não-homogêneo.

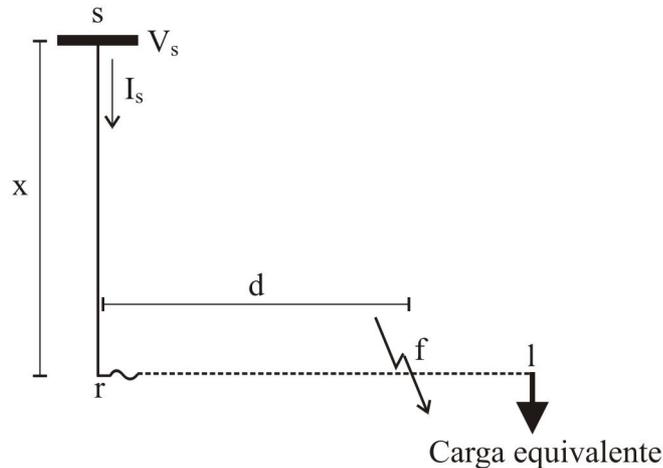


Figura 5.2 - Equivalente de Dois Terminais não-Homogêneo.

O sistema descrito acima é de simples análise, podendo ser usado para aumentar a eficiência computacional e facilitar o processo de localização de faltas. Implicações de se assumir valores pré-falta para as cargas nas 3 fases serão analisadas posteriormente, já que a impedância das cargas sofre variações de acordo com a tensão aplicada.

5.3 MÉTODO 1

5.3.1 JUSTIFICATIVA

O método 1 é um equacionamento direto para obtenção da distância ao ponto de falta que considera todas as combinações de fases elétricas que podem estar envolvidas no defeito. É um método simples com desempenho superior à medida da componente reativa da impedância e outros métodos encontrados na literatura que não levam em conta o carregamento do sistema e se restringem a faltas monofásicas (SANTOSO et al., 2000). Mesmo assim, possui baixos requisitos de memória computacional e tempo de processamento (podendo ser aplicado também em relés digitais).

A não-homogeneidade do alimentador é considerada à medida que o equivalente de dois terminais não-homogêneo é empregado. O método permite ainda levar em conta a não-transposição do alimentador na impedância série, eliminando uma das fontes de erro do processo.

5.3.2 TENSÕES NO ALIMENTADOR EQUIVALENTE

Novamente de posse da figura 5.2, as tensões nas três fases no nó r (V_{ra} , V_{rb} , V_{rc}) podem ser obtidas através da equação (5.1), onde a matriz de impedâncias se refere ao trecho entre os nós s e r . Supõe-se que o comprimento do trecho $s - r$ (denotado por x) e suas características de impedância *por unidade de comprimento* são conhecidas. As correntes e tensões (V_{si} e I_{si}) são as estimadas durante a falta a partir das medidas disponíveis na subestação em cada fase.

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} - x \cdot \begin{bmatrix} z_{sraa} & z_{srab} & z_{srac} \\ z_{srba} & z_{srbb} & z_{srbc} \\ z_{srca} & z_{srcb} & z_{srcc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

5.3.3 DISTÂNCIA AO PONTO DE FALTA

5.3.3.1 Falhas Fase-Terra

O diagrama da figura 5.3 (COSER et al, 2005b) mostra as conexões da resistência de falta e das cargas totais em cada fase para uma falta I_a-t . Nele, estão sendo mostradas as impedâncias mútuas e próprias do trecho $r-l$ e as conexões da resistência de falta (R_f) e das cargas (Z_{Ia} , Z_{Ib} , Z_{Ic}) em cada uma das fases.

A corrente I_{ra} é igual à medida na subestação durante a falta. A corrente I_{Ia} corresponde à carga equivalente total da fase a (obtida pelos valores pré-falta). A tensão V_{ra} pode ser escrita em função da distância do ponto r ao ponto de falta, denotada por d , e das impedâncias próprias e mútuas do trecho $r-l$ do alimentador *por unidade de comprimento* e das correntes de carga, conforme a equação (5.2):

$$V_{ra} = d.(z_{rlaa} \cdot I_{ra} + z_{rlab} \cdot I_{rb} + z_{rlac} \cdot I_{rc}) + (I_{ra} - I_{Ia}) \cdot R_f \quad (5.2)$$

Dividindo ambos os lados de (5.2) por $(I_{ra} - I_{Ia})$, obtém-se:

$$\frac{V_{ra}}{(I_{ra} - I_{Ia})} = d \cdot \left(z_{rlaa} \cdot \frac{I_{ra}}{(I_{ra} - I_{Ia})} + z_{rlab} \cdot \frac{I_{rb}}{(I_{ra} - I_{Ia})} + z_{rlac} \cdot \frac{I_{rc}}{(I_{ra} - I_{Ia})} \right) + R_f \quad (5.3)$$

Define-se:

$$K_{ft} = z_{rlaa} \cdot \frac{I_{ra}}{(I_{ra} - I_{Ia})} + z_{rlab} \cdot \frac{I_{rb}}{(I_{ra} - I_{Ia})} + z_{rlac} \cdot \frac{I_{rc}}{(I_{ra} - I_{Ia})} \quad (5.4)$$

Obtém-se d (em quilômetros) a partir da separação da equação anterior nas suas componentes real e imaginária, de acordo com a expressão (5.5).

$$d = \frac{\text{im} \left(\frac{V_{ra}}{(I_{ra} - I_{Ia})} \right)}{\text{im}(K_{ft})} \quad (5.5)$$

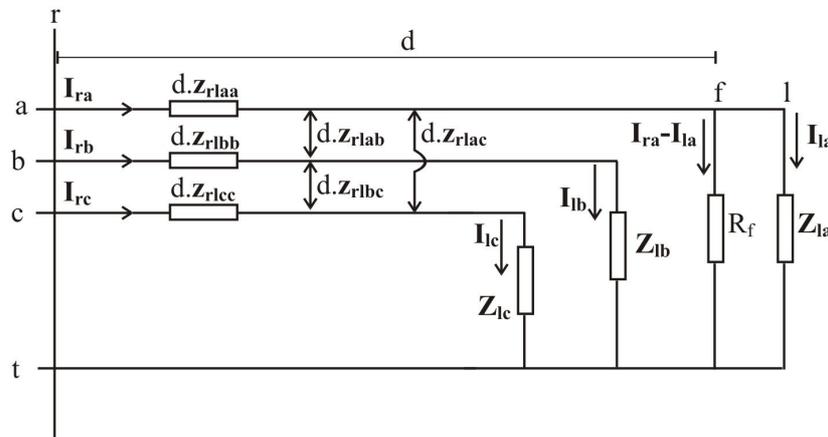


Figura 5.3 - Conexões da Resistência de Falta e Cargas para Falhas Fase-Terra.

A demonstração acima foi feita para uma falta na fase *a*. A tabela 5.1 traz as equações para faltas monofásicas envolvendo as outras fases.

Tabela 5.1 - Equações para Falhas Monofásicas Envolvendo as Fases *b* e *c* no Método 1.

Falta Tipo	K_{ft}	d (km)
<i>b - t</i>	$z_{rlbb} \frac{I_{rb}}{(I_{rb} - I_{lb})} + z_{rlab} \cdot \frac{I_{ra}}{(I_{rb} - I_{lb})} + z_{rlbc} \cdot \frac{I_{rc}}{(I_{rb} - I_{lb})}$	$d = \frac{im(V_{rb} / (I_{rb} - I_{lb}))}{im(K_{ft})}$
<i>c - t</i>	$z_{rlcc} \frac{I_{rc}}{(I_{rc} - I_{lc})} + z_{rlac} \cdot \frac{I_{ra}}{(I_{rc} - I_{lc})} + z_{rlbc} \cdot \frac{I_{rb}}{(I_{rc} - I_{lc})}$	$d = \frac{im(V_{rc} / (I_{rc} - I_{lc}))}{im(K_{ft})}$

5.3.3.2 Falhas Envolvendo mais de uma Fase

As conexões de impedância de falta e cargas para exemplos de faltas envolvendo mais de uma fase são mostrados nas figuras 5.4 (a) - (c). Quando essas faltas envolvem a terra, a impedância de falta é dividida em duas parcelas (DAS, 1998): R_f (que corresponde

à resistência de falta no caminho entre as fases) e R_f (que corresponde à resistência de falta para a terra).

Da mesma maneira que foi feito para as faltas monofásicas, será deduzida uma expressão ao cálculo da distância para um caso particular, envolvendo as fases a e b , para posteriormente fornecer as equações para o cálculo da distância aos demais tipos de falta. No circuito da figura 5.4 (a), escreve-se:

$$\begin{aligned} V_{ra} - d.(z_{rlaa} \cdot I_{ra} + z_{rlab} \cdot I_{rb} + z_{rlac} \cdot I_{rc}) - (I_{ra} - I_{la}) \cdot R_f = \\ V_{rb} - d.(z_{rlbb} \cdot I_{rb} + z_{rlab} \cdot I_{ra} + z_{rlbc} \cdot I_{rc}) - (I_{rb} - I_{lb}) \cdot R_f \end{aligned} \quad (5.6)$$

Rearranjando os termos:

$$\begin{aligned} V_{ra} - V_{rb} = [(I_{ra} - I_{la}) - (I_{rb} - I_{lb})] R_f + \\ d.(z_{rlaa} \cdot I_{ra} + z_{rlab} \cdot I_{rb} + z_{rlac} \cdot I_{rc} - z_{rlbb} \cdot I_{rb} - z_{rlab} \cdot I_{ra} - z_{rlbc} \cdot I_{rc}) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Dividindo ambos os lados da equação (5.7) pela relação $(I_{ra} - I_{la}) - (I_{rb} - I_{lb})$, obtém-se:

$$\begin{aligned} \left(\frac{V_{ra} - V_{rb}}{[(I_{ra} - I_{la}) - (I_{rb} - I_{lb})]} \right) = R_f + \\ \frac{d.(z_{rlaa} \cdot I_{ra} + z_{rlab} \cdot I_{rb} + z_{rlac} \cdot I_{rc} - z_{rlbb} \cdot I_{rb} - z_{rlab} \cdot I_{ra} - z_{rlbc} \cdot I_{rc})}{[(I_{ra} - I_{la}) - (I_{rb} - I_{lb})]} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Definindo-se:

$$K_{ff} = \frac{(z_{rlaa} \cdot I_{ra} + z_{rlab} \cdot I_{rb} + z_{rlac} \cdot I_{rc} - z_{rlbb} \cdot I_{rb} - z_{rlab} \cdot I_{ra} - z_{rlbc} \cdot I_{rc})}{[(I_{ra} - I_{la}) - (I_{rb} - I_{lb})]} \quad (5.9)$$

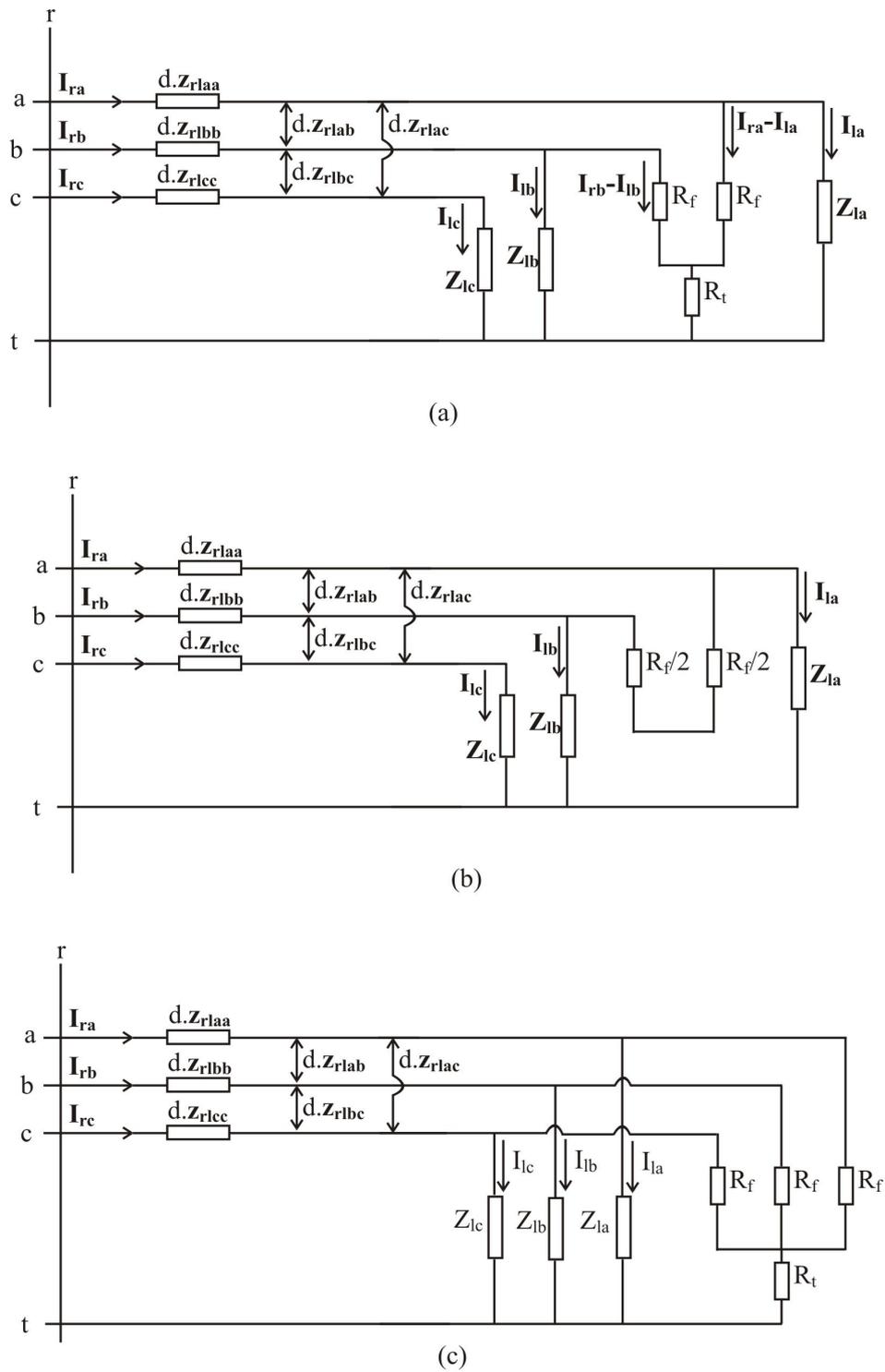


Figura 5.4 - (a) Conexões de Resistência de Falta e Cargas para Falhas *a-b-t*. (b) Conexões para Falhas *a-b*. (c) Conexões para Falhas Trifásicas.

Obtém-se d a partir de (5.10):

$$d = \frac{\text{im}\left(\mathbf{V}_{ra} - \mathbf{V}_{rb} / (\mathbf{I}_{ra} - \mathbf{I}_{la}) - (\mathbf{I}_{rb} - \mathbf{I}_{lb})\right)}{\text{im}(\mathbf{K}_{ff})} \quad (5.10)$$

O equacionamento desenvolvido acima pode ser utilizado para o cálculo de d também para as demais faltas mostradas na figura 5.4. No caso da falta mostrada na figura 5.4 (b), $R_f/2$ apareceria no lugar de R_f nas equações. É importante observar também que a localização de faltas trifásicas, como na figura 5.4 (c), pode utilizar apenas variáveis de duas fases (através das equações anteriores) e os acoplamentos mútuos entre as fases, intrínsecos do modelo. A referência de fases pode ser mantida constante para todas as faltas.

Tabela 5.2 - Equações a outras Falhas entre Fases.

Falta Tipo	d (km)
$b - c - (t)$	$\frac{\text{im}\left(\mathbf{V}_{rb} - \mathbf{V}_{rc} / (\mathbf{I}_{rb} - \mathbf{I}_{lb}) - (\mathbf{I}_{rc} - \mathbf{I}_{lc})\right)}{\text{im}(\mathbf{K}_{ff})}$
$a - c - (t)$	$\frac{\text{im}\left(\mathbf{V}_{ra} - \mathbf{V}_{rc} / (\mathbf{I}_{ra} - \mathbf{I}_{la}) - (\mathbf{I}_{rc} - \mathbf{I}_{lc})\right)}{\text{im}(\mathbf{K}_{ff})}$

A tabela 5.2 mostra as variáveis que devem ser utilizadas para o cálculo de outras faltas, entre duas fases, de modo a se obter d . O cálculo de \mathbf{K}_{ff} é o mesmo descrito anteriormente, utilizando no denominador as correntes das fases envolvidas.

5.4 MÉTODO 2

5.4.1 JUSTIFICATIVA

No método 2 a distância ao ponto de falta é obtida através de um processo iterativo baseado na característica resistiva da impedância de falta. Diferentemente dos métodos similares (SRINIVASAN et al., 1989, DAS et al., 2000), o conceito de alimentador equivalente não-homogêneo de dois terminais é empregado. Dessa forma, elimina-se um grande inconveniente: a necessidade de estimação prévia de todas as possíveis seções em falta.

A segunda característica, que difere os métodos propostos daqueles já existentes nessa linha, é o emprego do modelo a parâmetros concentrados, ao invés da formulação baseada em parâmetros distribuídos para expressar as relações entre tensões e correntes no alimentador. A capacitância em derivação do alimentador, que é necessária no modelo a parâmetros distribuídos, não será levada em conta nos cálculos.

O terceiro ponto considerado é que as cargas são obtidas através dos dados pré-falta e são mantidos constantes durante todo o processo iterativo. Por ser o método voltado à localização de faltas de baixa impedância, acredita-se que essa compensação para as cargas é suficiente para a obtenção de resultados satisfatórios.

Toda a formulação do método 2 segue o mesmo procedimento dos métodos similares existentes, no que se refere à utilização dos dados em componentes de sequência positiva, negativa e zero.

5.4.2 TENSÕES NO ALIMENTADOR EQUIVALENTE

As tensões e correntes de sequência positiva, negativa e zero na subestação são obtidas a partir das transformações definidas em (5.11) e (5.12). Com a transposição-

equivalente assumida, a matriz de transformação é igual para tensões e correntes, e os três modos obtidos, correspondentes a cada uma das seqüências, são independentes (SCOTT-MEYER, 1992).

$$\begin{bmatrix} V_{s0} \\ V_{s1} \\ V_{s2} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j120} & e^{-j120} \\ 1 & e^{-j120} & e^{j120} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$\begin{bmatrix} I_{s0} \\ I_{s1} \\ I_{s2} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j120} & e^{-j120} \\ 1 & e^{-j120} & e^{j120} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Tensões e correntes nos nós s e r se relacionam de acordo com a expressão (5.13), onde x é a distância em quilômetros entre os nós s e r (valor conhecido). Essa relação é válida para as seqüências positiva, negativa e zero. Novamente, deve-se atentar para o fato da impedância z_{sr} ser expressa em Ω/km .

$$\begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -x \cdot z_{sr} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Deve-se calcular (5.13) de forma independente *para cada uma das seqüências*, obtendo-se as tensões e correntes em r , antes de se iniciar o cálculo da distância ao ponto de falta. As correntes em r são feitas iguais àquelas medidas na subestação (mesma aproximação usada no método 1).

5.4.3 DISTÂNCIA AO PONTO DE FALTA

No circuito da figura 5.5, as seguintes relações (5.14) e (5.15) são válidas para cada uma das seqüências (positiva, negativa e zero) de acordo com SRINIVASAN et al., 1989. As tensões, correntes, e impedâncias indicadas são genéricas, para poder se referir a cada uma das seqüências. A variável d corresponde, como anteriormente, à distância do ponto r

ao ponto de falta. O comprimento do segmento em falta y é suposto conhecido.

$$\begin{bmatrix} V_f \\ I_{fr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -d.z_{rl} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

$$\begin{bmatrix} V_l \\ -I_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -(y-d).z_{rl} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ I_{fr} \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

As correntes no nó f se relacionam de acordo com (5.16):

$$I_f = -I_{fr} - I_{fl} \quad (5.16)$$

Pode-se mostrar também que:

$$\begin{bmatrix} 1 & -y.z_{rl} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -(y-d).z_{rl} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ I_{fr} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

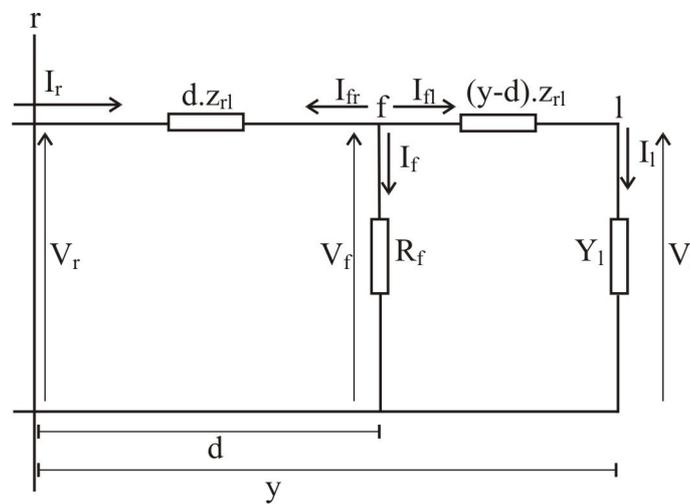


Figura 5.5 - Circuito para Definição do Método Baseado no Modelo Transposto-Equivalente.

A admitância da carga equivalente Y_l , por sua vez, é usada para relacionar as variáveis V_l e I_l , de acordo com a equação (5.18). Essa admitância é de valor conhecido na formulação proposta aqui, sendo obtida para cada fase através da razão entre a corrente e a

tensão antes da falta. Para faltas monofásicas o valor obtido para a fase correspondente é atribuído às 3 componentes de seqüência (dado que as cargas são independentes nas 3 fases). Para faltas entre fases, as 3 componentes de seqüência de \mathbf{Y}_l , são feitas iguais à média dos valores obtidos para essa variável nas fases envolvidas no defeito.

$$\mathbf{I}_l = \mathbf{Y}_l \cdot \mathbf{V}_l \quad (5.18)$$

Com as relações entre as variáveis expressas acima, pode-se calcular a corrente e a tensão no ponto de falta a partir dos valores conhecidos de \mathbf{V}_r e \mathbf{I}_r (que, por sua vez, foram obtidos através das medidas na subestação). É preciso combinar as equações para eliminar os parâmetros não conhecidos, à exceção da variável d , que será estimada iterativamente.

A partir disso, \mathbf{I}_f e \mathbf{V}_f são obtidos nas equações (5.19) e (5.20). A tensão \mathbf{V}_l no ponto de carga terminal do alimentador-equivalente, que também aparece na equação (5.19), é uma informação adicional não utilizada no processo de localização da falta.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_l \\ \mathbf{I}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (y-d)z_{rl} \\ -\mathbf{Y}_l & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & -y.z_{rl} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_r \\ \mathbf{I}_r \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

$$\mathbf{V}_f = \mathbf{V}_r - d.z_{rl}.\mathbf{I}_r \quad (5.20)$$

As relações acima devem ser calculadas de forma independente para cada uma das seqüências, utilizando os parâmetros de impedância, tensões, e correntes correspondentes.

A distância ao ponto de falta d , que não é conhecida, é obtida iterativamente, como já foi dito. Pode-se atribuir o valor inicial zero e incrementar a variável em passos definidos dentro do trecho investigado, até que a condição de convergência seja atendida. Essa condição depende do tipo de falta. As relações constantes na tabela 5.3 correspondem aos diferentes os casos possíveis (SRINIVASAN et al., 1989).

Tabela 5.3: Condições de Convergência de acordo com o Tipo de Falta.

<i>Tipo de Falta</i>	<i>Condição de Convergência</i>
<i>Fase-terra</i>	$\frac{V_{f0} + V_{f1} + V_{f2}}{I_{f0} + I_{f1} + I_{f2}} \leq tol.$
<i>Envolvendo 2 fases</i>	$\frac{V_{f1} - V_{f2}}{I_{f1} - I_{f2}} \leq tol.$
<i>Envolvendo 3 fases</i>	$\frac{V_{f1}}{I_{f1}} \leq tol.$

“tol.” é a tolerância adotada (um valor bem pequeno, como 1.10^{-4}).

Ao se utilizar componentes simétricas, como nessa formulação, deve-se atentar para a referência de fases utilizada nos cálculos. A tabela 5.4 traz a referência correta para a obtenção da distância ao ponto de falta de acordo com as fases envolvidas (DAS, 1998).

Tabela 5.4 - Referência de Fases Correta de Acordo com o Tipo de Falta.

<i>Tipo de Falta</i>	<i>Referência</i>
<i>a - t</i>	fase <i>a</i>
<i>b - t</i>	fase <i>b</i>
<i>c - t</i>	fase <i>c</i>
<i>a - b - (t)</i>	fase <i>c</i>
<i>b - c - (t)</i>	fase <i>a</i>
<i>a - c - (t)</i>	fase <i>b</i>
<i>a - b - c - t</i>	fase <i>a</i>

5.4.4 SUMÁRIO DO ALGORITMO ITERATIVO

De acordo com o que foi descrito acima, para sumarizar o algoritmo iterativo

proposto para se obter a distância ao ponto de falta, a seguinte seqüência de passos pode ser escrita:

1. Obtenção das tensões de seqüência positiva, negativa e zero nos nós anteriores ao trecho em falta investigado, a partir das tensões e correntes de seqüência medidas na subestação, através da equação em (5.13);
2. Atribuição do valor zero para a distância ao ponto de falta (d) dentro do segmento investigado;
3. Cálculo das expressões (5.19) e (5.20), para cada uma das seqüências;
4. Verificação da condição de convergência de acordo com o tipo de falta, dada na tabela 5.3;
5. Em caso de não-convergência, incrementa-se a variável que corresponde à distância ao ponto de falta e executam-se novamente os passos 3 e 4, até que a condição de convergência seja atendida.

A fim de acelerar o processo de convergência do algoritmo, a variável d pode ser incrementada de uma maneira lógica, buscando o ponto onde a componente imaginária da impedância de falta se iguala a zero. O emprego de técnicas numéricas baseadas no cálculo das derivadas para buscar o zero da função é dificultado nesse sentido, à medida que a função depende do cálculo e inversão de matrizes para cada uma das seqüências, e quocientes entre quantidades provenientes dessas matrizes. Porém, pode-se lançar mão de um procedimento baseado no comportamento da função, que possui a forma mostrada na figura 5.6.

Esse comportamento-padrão da função da componente imaginária da impedância de falta em função da distância foi verificado em todos os casos para o qual o algoritmo foi

aplicado e convergiu, apontando corretamente a distância ao ponto de falta em simulações de defeitos em ramos radiais com cargas distribuídas de diversas maneiras. Os coeficientes da curva podem mudar, mas o seu formato é sempre do padrão mostrado na figura.

Com base nesse comportamento, propõe-se o seguinte procedimento: a partir do início do trecho investigado incrementa-se a variável d em passos iguais a 10% do comprimento total do trecho. No ponto onde se verificar que a função $im(Z_f)$ pára de diminuir, faz-se a busca no sentido contrário a partir desse ponto, incrementando-se a variável d em passos de um metro até a convergência. Dessa forma, não é preciso efetuar os cálculos para toda a extensão do trecho investigado, aliviando-se a demanda computacional consideravelmente.

Caso o algoritmo não obtenha um valor para a componente imaginária da impedância de falta inferior à tolerância especificada seguindo esse procedimento, significa que a falta não está nos limites do trecho investigado, do ponto de vista do algoritmo.

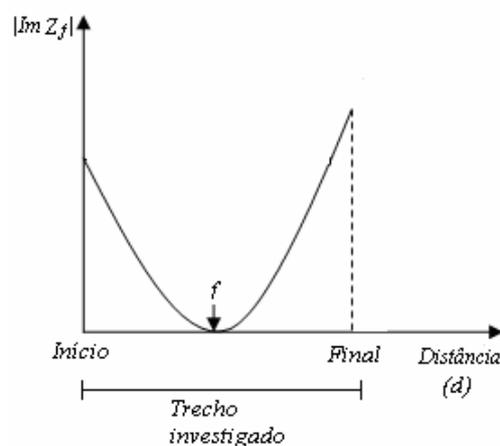


Figura 5.6 – Comportamento-Padrão da Função Componente Imaginária da Impedância de Falta

(Z_f) em Função da Distância ao Ponto de Falta nas Equações da Tabela 5.3.

5.5 GENERALIZAÇÃO DOS ALGORITMOS ANALÍTICOS PROPOSTOS

Os algoritmos das seções anteriores foram descritos para um exemplo com o trecho em falta definido previamente, com o intuito de simplificar as discussões. O objetivo desta seção é estender os procedimentos a outros casos possíveis e contemplar a questão das múltiplas possibilidades para a localização da falta. As descrições são válidas para os dois métodos.

5.5.1 MÚLTIPLAS POSSIBILIDADES PARA A LOCALIZAÇÃO DA FALTA

Em um caso real não se sabe, a priori, se a falta está no alimentador principal ou em qualquer uma das derivações laterais. Os cálculos para a distância devem então ser efetuados investigando-se todos os trechos do alimentador. É importante salientar que esse procedimento ainda é bem menos exaustivo do que a investigação de todas as seções em falta possíveis, que caracteriza os métodos de boa precisão existentes (ZHU et al., 1997, DAS et al., 2000).

Posteriormente à determinação das possíveis soluções candidatas, uma análise da variação da carga suprida ao alimentador mediante a atuação da proteção, ou os elementos adicionais que serão descritos no Capítulo 7, podem ser empregados para se obter a localização mais provável do defeito.

5.5.2 SEGMENTO EM FALTA NÃO-HOMOGÊNEO

No exemplo que foi usado na descrição dos métodos, o trajeto da subestação até o início do segmento em falta possuía uma determinada característica de impedância por unidade de comprimento, e o trecho investigado possuía outra que não sofria novas alterações ao longo de seu trajeto. Entretanto, o trecho investigado para se calcular a

distância ao ponto de falta pode ser composto por mais de um tipo de condutor, como na figura 5.7 (a).

Nessas situações, deve-se alocar a carga equivalente no primeiro nó que caracteriza a mudança no tipo de condutor, e calcular a distância ao ponto de falta. Caso o valor de distância resultante esteja além do trecho investigado (ou não haja convergência do processo, no caso do método 2), deve-se alocar a carga no nó seguinte e proceder dessa maneira até a obtenção de uma resposta viável, como indica a figura 5.7 (b). Duas tentativas no caso mostrado devem levar a uma resposta fisicamente viável (que corresponde à distância até o ponto f).

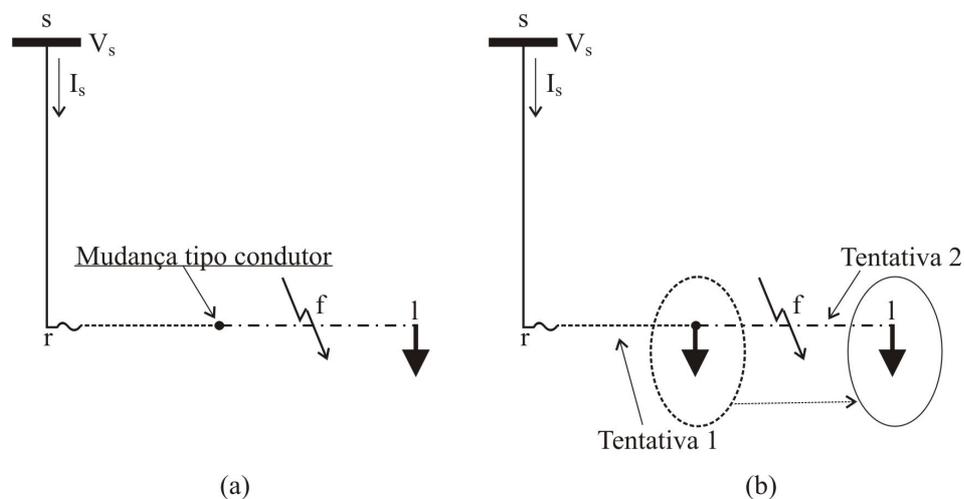


Figura 5.7 - (a) Segmento em Falta com Mudança no Tipo de Condutor (b) Processo de Localização da Falta.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dois métodos analíticos para localização de faltas de baixa impedância apresentados nesse capítulo são caracterizados por formulações simples favorecidas pelo emprego do modelo equivalente não-homogêneo de dois terminais.

O método 1, que é direto, possibilita a localização de faltas em qualquer combinação de fases envolvidas e leva em conta parâmetros ignorados nos métodos diretos pesquisados (não-transposição, não-homogeneidade, e cargas). A distância ao ponto de falta é obtida através de uma única equação dependente do tipo de falta.

O método 2, que é iterativo, inclui algumas simplificações nos métodos existentes que tornam o processo mais dinâmico, não sendo necessário investigar todas as seções do alimentador, mas sim os trechos principais (tronco principal e derivações laterais). A compensação da carga com base nos valores pré-falta deve ser suficiente ao se tratar de faltas onde a corrente de falta possui magnitude significativamente superior à corrente das cargas, caracterizando as faltas de baixa-impedância.

No próximo capítulo será proposta a metodologia baseada em redes neurais para a localização de faltas de alta-impedância.

CAPÍTULO 6

METODOLOGIA BASEADA EM REDES NEURAIIS PARA FALTAS DE ALTA-IMPEDÂNCIA

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As limitações observadas nos trabalhos analisados no Capítulo 3 motivaram estudos para sugerir melhorias aos métodos para localização de faltas em alimentadores baseados em redes neurais com fasores das componentes fundamentais de tensões e/ou correntes nos dados de entrada. As novas alternativas propostas são descritas neste capítulo, constituindo uma nova metodologia.

A técnica se aplica à localização de faltas de alta-impedância devidas a contatos de árvores e condutores caídos ou partidos. Todos os casos estudados aqui serão de faltas fase-terra, já que é muito rara a ocorrência de faltas de alta-impedância entre fases (DAS, 1998). O emprego de redes neurais para localização de faltas de baixa-impedância não se justifica na maioria das situações práticas, à medida que métodos analíticos fornecem boas respostas nesse sentido (COSER et al., 2004a).

Antes da descrição da metodologia serão apresentados conceitos fundamentais sobre redes neurais ligados ao desenvolvimento do trabalho.

6.2 TÓPICOS SOBRE REDES NEURAIIS

A teoria sobre redes neurais está bem documentada em uma série de livros e

artigos, alguns já referenciados no Capítulo 3. O propósito desta seção é fornecer elementos relevantes para a aplicação específica de localização de faltas em alimentadores de distribuição, e conceitos básicos relacionados, principalmente, com os *perceptrons* de múltiplas camadas que utilizam o algoritmo de aprendizado por retropropagação de erro.

Embora redes de função de base radial também tenham sido implementadas, optou-se por utilizar o primeiro tipo de rede citado como padrão, em função de melhores resultados obtidos para a metodologia proposta. A descrição dos estudos sobre a aplicação das redes de função de base radial integrando a metodologia proposta está descrita na referência (COSER et al., 2005c).

6.2.1 O QUE É UMA REDE NEURAL

De acordo com HAYKIN (1994): uma rede neural é um processador constituído de unidades funcionais simples (neurônios), que têm propensão natural de armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso. Ela se assemelha ao cérebro humano em dois aspectos principais, a saber:

1. O conhecimento é adquirido pela rede a partir do seu ambiente através de um processo de aprendizagem;
2. As forças de conexão entre os neurônios, ou pesos sinápticos, são utilizados para o armazenamento do conhecimento adquirido.

No que se chama *treinamento supervisionado*, é apresentado um conjunto de exemplos, ou amostras de treinamento, a partir do qual a rede neural pode determinar o mapeamento de entrada-saída do problema através a minimização iterativa dos erros das respostas da rede para as respostas desejadas. Essa determinação é feita através,

justamente, do ajuste dos pesos sinápticos citados acima.

6.2.2 PRINCIPAIS BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES

As principais vantagens, comumente referenciadas, do emprego das redes neurais são as seguintes:

- *Capacidade de generalização*: a partir do processo de treinamento, as redes neurais conseguem fornecer respostas a casos não constantes no conjunto de treinamento. Logicamente, a capacidade de generalização depende da eficiência do processo de treinamento;
- *Não-linearidade*: uma rede neural constituída por neurônios não-lineares é ela mesma não-linear. Assim sendo, problemas altamente não-lineares e complexos podem ter seu mapeamento entrada-saída determinado. Em problemas onde, muitas vezes, a determinação desse mapeamento é inviável via procedimentos analíticos, as redes neurais fornecem uma alternativa viável;
- *Adaptabilidade*: uma rede neural treinada com um determinado conjunto de amostras pode, se necessário, ser re-treinada de modo a se adaptar a novas situações no ambiente onde ela está inserida. Dessa forma, os pesos sinápticos podem facilmente ser adaptados para a operação da rede frente a mudanças ou novos exemplos que se julgue relevante ser levados em conta no treinamento;
- *Paralelismo*: o emprego de processamento paralelo é favorecido em redes neurais, pois muitos cálculos podem ser executados simultaneamente.

As redes neurais também têm algumas limitações práticas. Tais inconvenientes não depreciam a sua aplicabilidade, mas devem ser levados em conta no projeto e validação de

ferramentas baseadas nessa técnica. Abaixo, os principais pontos relacionados a isso:

- Da mesma forma que o cérebro humano leva um especialista a expressar a sua opinião, sem muitas vezes explicá-la ou prová-la, as redes neurais fornecem resultados cuja confiabilidade não pode ser assegurada de imediato. Entretanto, existem procedimentos adequados à validação das mesmas que podem tornar tais resultados altamente confiáveis;
- Os métodos de treinamento são bastante complexos, na maioria dos casos, e dependem de muitos parâmetros cujo ajuste varia de uma aplicação para a outra. É necessário, muitas vezes, uma série de procedimentos ordenados de modo a se determinar tais parâmetros e se obter o melhor desempenho;
- O treinamento de uma rede neural pode se tornar computacionalmente pesado, demandando muitas horas para a convergência do processo. Isso é um problema relacionado ao estudo de fenômenos com grande número de variáveis envolvidas e uma variedade de casos muito grande presente no conjunto de treinamento.

6.2.3 PERCEPTRONS DE MÚLTIPLAS CAMADAS E O ALGORITMO DE RETROPROPARAÇÃO DE ERRO

A figura 6.1 mostra uma rede neural *perceptron* de múltiplas camadas (três, nesse caso). Todos os neurônios de camadas adjacentes são conectados. As conexões estão associadas a *pesos* sinápticos. O número de neurônios em cada camada, para uma determinada aplicação, depende, obviamente, das características do problema estudado. Na camada intermediária, o aumento do número de neurônios necessários a um bom

desempenho está associado ao aumento da complexidade da função entrada/saída definida pelas amostras de treinamento.

Perceptrons de múltiplas camadas podem ser treinados pelo algoritmo de retropropagação de erro, ou simplesmente *algoritmo de retropropagação*. Nessa forma de treinamento supervisionado, os pesos são ajustados, na iteração n , através da retropropagação apropriada dos sinais de erro $e_j(n)$, da camada de saída em direção à camada de entrada. Tais sinais constituem as diferenças entre o valor produzido pelo neurônio j na saída da rede $y_j(n)$, quando uma amostra é apresentada, e o valor desejado $d_j(n)$, conforme (6.1). Considera-se aqui que os exemplos de treinamento são apresentados um por vez, seqüencialmente.

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (6.1)$$

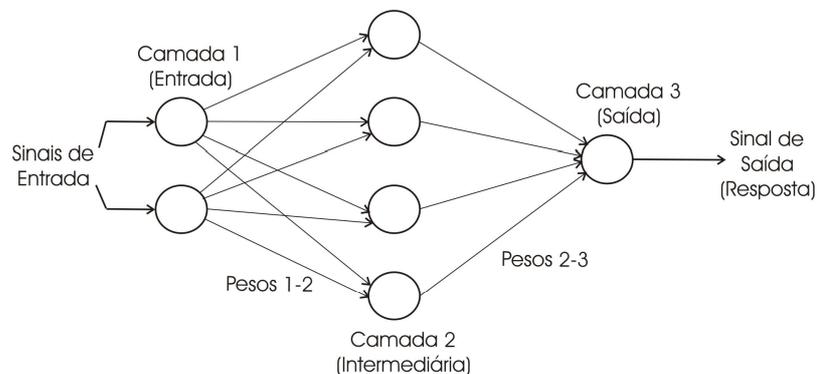


Figura 6.1 : Rede Neural Tipo *Perceptron* de Três Camadas.

Em uma iteração n , a energia total do erro para todos os neurônios que pertencem ao conjunto c da camada de saída é dada por (6.2)

$$\xi(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad (6.2)$$

O erro médio sobre todo o conjunto de N amostras de treinamento, expresso em (6.3) é uma medida do desempenho da aprendizagem, e é comumente utilizado como critério de parada. Ele é função dos parâmetros livres da rede neural (pesos sinápticos)

$$\xi_{med} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \xi(n) \quad (6.3)$$

Os neurônios da camada intermediária e da camada de saída respondem ao somatório das entradas multiplicadas pelos pesos sinápticos, de acordo com uma *função de ativação* não-linear, suave (diferenciável em qualquer ponto). Uma função que atende essas características é a *sigmoide*, definida pela função logística em (6.4). Nela, y_j é a saída do neurônio j , e v_j é o *campo local induzido*, ou somatória ponderada das entradas sinápticas.

$$y_j = \frac{1}{1 + \exp(-v_j)} \quad (6.4)$$

Os principais passos do algoritmo de retropropagação podem ser relacionados como:

1. *Inicialização*: os pesos sinápticos são inicializados a partir de uma distribuição uniforme com média zero e variâncias escolhidas de acordo com a função de ativação dos neurônios;
2. *Apresentação das amostras de treinamento*: para cada padrão entrada/saída desejada, realizam-se as operações dos passos seguintes, constituindo uma

época de treinamento;

3. *Computação para frente (propagação)*: calculam-se os valores de saída da rede neural, em função das entradas apresentadas, dos pesos sinápticos e das funções de ativação dos neurônios;
4. *Computação para traz (retropropagação) para ajuste dos pesos sinápticos*: em função dos erros obtidos nos neurônios de saída, com relação às saídas desejadas, o ajuste dos pesos sinápticos entre as camadas i e j , é feito de acordo com a *regra delta generalizada* (Rumelhart et al., 1986), representada em (6.5), no sentido da saída para a entrada da rede (retropropagação);

$$\Delta\omega_{ji}(n) = \alpha\Delta\omega_{ji}(n-1) - \eta \frac{\partial \xi(n)}{\partial \omega_{ji}} \quad (6.5)$$

Os parâmetros *constante de momento* α e, principalmente, *taxa de aprendizado* η , têm grande influência na eficiência do processo de treinamento. Usualmente, valores pequenos (entre 10^{-3} e 10^{-2}) são utilizados para a taxa de aprendizado, que determina o montante de correção a cada iteração. O termo de momento aumenta a estabilidade do processo, e, em geral valores próximos à unidade (elevados, em comparação à taxa de aprendizado) são empregados.

5. *Verificação do critério de parada*: a seqüência de operações descrita acima deve ser repetida até que o critério de parada especificado seja atingido. O número de épocas de treinamento e o erro médio sobre o conjunto de amostras de treinamento, definido anteriormente, são os critérios de parada mais comuns.

No método do gradiente para ajuste dos pesos sinápticos, que corresponde à abordagem descrita acima, os mesmos são ajustados na direção de maior decréscimo da

função de erro, ou seja, o negativo do seu gradiente calculado em relação aos próprios pesos sinápticos.

O treinamento utilizando o método do gradiente no estágio de computação para trás é uma forma muito empregada para a obtenção dos pesos sinápticos que forneçam um erro médio quadrático minimizado. Entretanto, existem outras formas possíveis adequadas a aplicações onde a questão da velocidade de processamento é crítica.

Um algoritmo bastante empregado, considerando esse fato, é o de *Levenberg e Marquardt* (MARQUARDT, 1963). O método se baseia na determinação da matriz de derivadas de segunda ordem da função de erro em função dos pesos sinápticos e otimização iterativa do vetor de pesos. Embora o montante de cálculos por iteração seja maior que o do método do gradiente, devido à necessidade do cálculo das derivadas de segunda ordem, ele é mais rápido em redes neurais com um número razoável de parâmetros a ajustar. Sua eficiência diminui quando o número de parâmetros a ser ajustado é demasiadamente elevado.

6.2.4 QUESTÕES IMPORTANTES AO TREINAMENTO E VALIDAÇÃO DE UMA REDE NEURAL

A fim de se obter eficiência no processo de treinamento, e bom desempenho no estágio de validação, onde se avalia a capacidade de generalização de uma rede neural, algumas questões importantes devem ser levadas em conta.

6.2.4.1 Generalização x Memorização

Há uma diferença importante entre generalização e memorização, no campo de estudo de redes neurais: diz-se que uma rede *generaliza* bem, quando ela responde com erros de magnitudes semelhantes na fase de treinamento e na fase de teste, ou fase de validação, como já foi mencionado.

Em FLEXER (1996), é apresentado um apanhado de técnicas para determinação de conjuntos de treinamento e validação. De acordo com os autores, mesmo que se utilize validação cruzada com diferentes combinações de conjunto de treinamento e validação, é necessário que um conjunto de dados seja separado para testar a rede neural, sendo que tal conjunto não deve ser utilizado em nenhum estágio da fase de treinamento.

Em redes perceptrons de múltiplas camadas, e suas aplicações típicas, a *memorização* implica uma resposta com erro nulo, quando uma amostra já utilizada no treinamento é apresentada. Essa condição, na maioria dos casos, está associada a uma generalização pobre, treinamento excessivo, e um grau de liberdade elevado demais devido a excesso de parâmetros livres (pesos sinápticos das conexões entre neurônios).

6.2.4.2 Número de Neurônios

O número de camadas intermediárias de neurônios, bem como o número de neurônios em cada uma delas, deve, de algum modo, se adequar à complexidade da função entrada/saída determinada pelas amostras de treinamento.

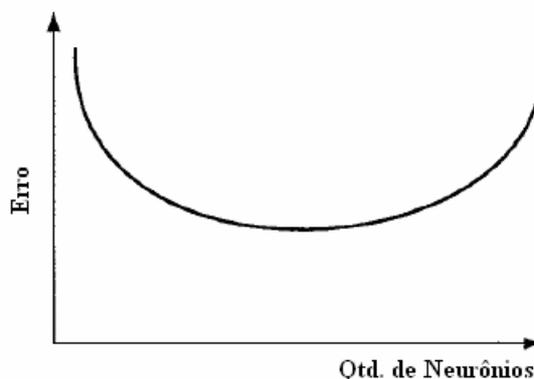


Figura 6.2: Erro em Função do Número de Neurônios.

É comum existir um número ótimo de neurônios intermediários para o qual o erro

sobre o conjunto total de amostras de treinamento e validação é reduzido, como mostra a figura 6.2 (AGGARWAL et al., 1998a). Na situação mostrada, ao se aumentar o número de neurônios, o erro é inicialmente reduzido até um ponto ótimo. Posteriormente, a utilização de mais neurônios leva a um aumento no erro, atribuído ao problema da memorização.

6.2.4.3 Critério de Parada

Uma vez escolhido o número de camadas e neurônios, o treinamento excessivo pode, novamente, remeter ao problema de memorização. O critério de parada do treinamento deve ser determinado para que a rede responda com erros de magnitude semelhante nas fases de treinamento e validação. Assim sendo, é necessário testar a rede para diferentes valores do erro médio quadrático a fim de se obter a condição mencionada.

A escolha da configuração adequada de uma rede neural é um problema muito discutido, para o qual não existe solução geral ou definitiva. As questões descritas acima devem ser monitoradas e utilizadas para auxiliar no projeto da rede.

6.2.5 REDES NEURASIS EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Os sistemas elétricos modernos demandam por criteriosos estudos de operação em tempo real e planejamento que os permitam suprir energia de alta qualidade aos clientes. Em muitos desses estudos, existem modelos matemáticos satisfatórios que podem ser utilizados a avaliar um determinado cenário ou obter a resposta a uma contingência. Entretanto, em sistemas complexos, ou em casos onde diversas incertezas se fazem presentes, os modelos matemáticos convencionais podem conduzir a respostas inexatas ou demandar excessivo esforço computacional. Até mesmo a utilização de sistemas especialistas se torna complicada face ao número de possibilidades de ajuste das variáveis

de controle em determinadas situações.

As redes neurais surgem como uma alternativa nesse contexto, e diversos pesquisadores têm se motivado a empregá-las na solução, principalmente, dos seguintes problemas (AGGARWAL et al., 1998b):

- Previsão de Carga;
- Análise de segurança;
- Controle;
- Planejamento;
- Proteção digital;
- *Localização de faltas.*

Particularmente, o último item citado acima é o objeto deste capítulo.

À medida que diversos produtos baseados em redes neurais técnica são desenvolvidos com bons resultados, novos setores da pesquisa e desenvolvimento certamente tenderão a explorar as suas vantagens e dar maior credibilidade aos seus resultados.

Entre os engenheiros de sistemas de potência, particularmente os interessados em localização de faltas, os *perceptrons* de múltiplas camadas com o algoritmo de aprendizado de retropropagação, e método do gradiente para ajuste dos pesos sinápticos, constituem a arquitetura de rede neural mais popular.

A seguir, será descrita, a partir da sua justificativa, a nova metodologia proposta para localização de faltas em alimentadores de distribuição baseada em redes neurais.

6.3 JUSTIFICATIVA DA METODOLOGIA BASEADA EM REDES NEURAIIS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA-IMPEDÂNCIA

Dois pontos principais foram objetos dos desenvolvimentos da nova metodologia, porque são limitações evidentes dos métodos existentes: a consideração adequada com a estrutura dos alimentadores (que contêm derivações laterais), e a obtenção da localização pontual da falta (ao invés da seção em falta) como variável de saída. Para tanto, entende-se que o melhor procedimento é treinar redes neurais independentes para diferentes trechos do alimentador, sendo que os neurônios da camada de saída devem fornecer valores proporcionais à distância do início do trecho ao ponto de falta, dentro do intervalo da sua função de ativação contínua.

6.4 ESSÊNCIA DA METODOLOGIA - ARQUITETURA MODULAR COM REDES NEURAIIS

A figura 6.3 ilustra o mesmo alimentador utilizado como exemplo em seções anteriores, e três diferentes pontos de falta. Importante: essas faltas não são simultâneas.

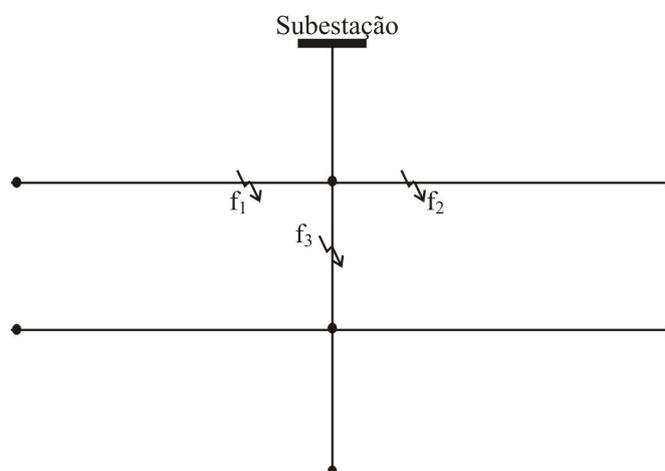


Figura 6.3 - Pontos de Falta que Levam a Valores Semelhantes de Tensões e Correntes.

Se os valores da resistência de falta forem semelhantes nas três situações, as tensões e correntes resultantes podem ser iguais (ou muito similares). Não é possível distinguir eventos desse tipo com base, unicamente, nas tensões e correntes medidas na subestação durante a falta. Apresentar casos de falta como os mostrados acima a uma rede neural, e esperar que ela responda corretamente a novas ocorrências semelhantes, não é uma boa estratégia.

Imagine ainda a inclusão, no conjunto de treinamento, de faltas com diferentes valores de impedância, em inúmeras localizações possíveis no alimentador. A complexidade da função entrada/saída cresce e a torna difícil de ser mapeada.

A fim de contornar esses inconvenientes, propõe-se aqui uma nova técnica: a chamada de *arquitetura modular de redes neurais*.

A base para o seu desenvolvimento é a análise do comportamento entrada/saída do problema, quando tratado em partes. Em uma série de estudos de simulações no programa ATP, utilizando um ramo radial com cargas uniformemente distribuídas, pode-se notar, ao se simular faltas ao longo do circuito, que a magnitude e a defasagem das tensões e correntes variam de formas diferentes, em função (a) da localização da falta; (b) da resistência de falta, da maneira mostrada na figura 6.4 (COSER et al., 2005c). *Embora a função resultante seja complexa, não possui descontinuidades ou valores redundantes, o que favorece o seu mapeamento via redes neurais.*

Assim sendo, na arquitetura modular, utilizam-se redes neurais independentes para localizar faltas em diferentes trechos do alimentador. *Cada rede neural deve ser treinada com faltas simuladas ao longo do seu trecho e valores de resistência diversos em um modelo do alimentador, e os valores medidos na subestação empregados no treinamento.* Os trechos associados às diferentes redes neurais não podem conter derivações laterais

(para não haver superposição de variáveis ou descontinuidades na função entrada/saída resultante).

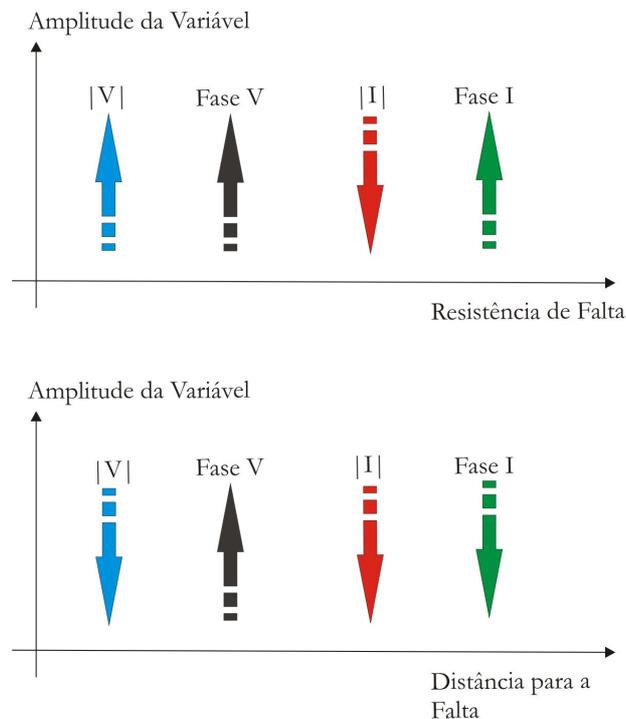


Figura 6.4 – Comportamento das Variáveis Vistas no Início do Alimentador, ao se Simular Falhas ao Longo de um Ramo Radial com Cargas Uniformemente Distribuídas.

A figura 6.5 ilustra a divisão do alimentador-exemplo já utilizado anteriormente, para definição dos trechos que devem conter redes neurais independentes.

A pergunta que surge de imediato é: “Como saber em qual trecho está a falta, para acionar a rede neural correta?”. Remete-se, novamente, ao problema das múltiplas possibilidades para a localização de uma falta em um alimentador. Ao final da descrição da técnica, na Seção 6.10, essa questão será tratada oportunamente, da mesma maneira que foi nos métodos analíticos.

Retornando à discussão central desta seção, ao se tornar mais simples a função entrada/saída a ser mapeada, através da arquitetura modular proposta, se reduz também o número de casos necessários a uma boa generalização e à obtenção de bons resultados na fase de testes da ferramenta.

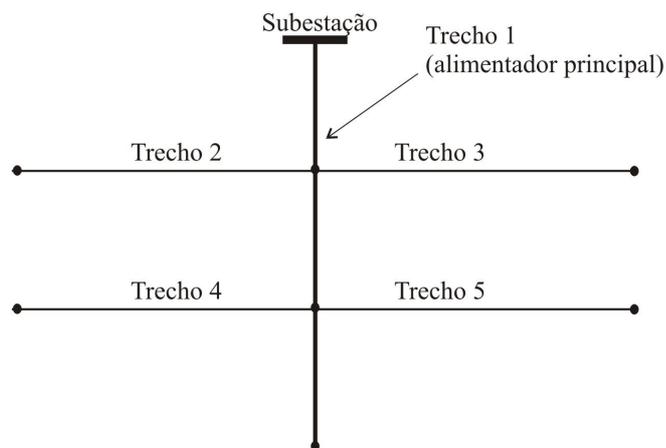


Figura 6.5 - Trechos Associados a Redes Neurais Independentes.

Faltas de diferentes tipos, com relação às fases elétricas envolvidas, também devem ser localizadas por diferentes redes neurais, novamente para tornar mais simples a função a ser mapeada pelas redes a serem treinadas. Então, para cada trecho devem ser treinadas 11 redes neurais diferentes, que correspondem aos diversos tipos de falta descritos no Capítulo 2.

Assim sendo, para o alimentador da figura 6.5, que possui 5 trechos, seriam necessárias 55 redes neurais para se localizar todos os tipos de falta possíveis em todos os trechos. Como esse montante é bastante elevado, um segundo procedimento integra a metodologia, com a finalidade de reduzir a necessidade de redes neurais independentes, e consequentemente, reduzir o montante de dados no levantamento de amostras de treinamento.

6.5 PROCEDIMENTO PARA REDUZIR O MONTANTE DE REDES NEURAIAS NECESSÁRIAS NA ARQUITETURA MODULAR

Na arquitetura modular, o ideal é que cada derivação lateral possua uma rede neural associada a ela, treinada com dados de faltas simuladas nos seus limites, responsável por localizar faltas nesses mesmos limites. Porém, em alimentadores com um grande número de derivações laterais, é conveniente encontrar maneiras de se diminuir o número de redes neurais a serem treinadas, a fim de facilitar a implementação da ferramenta.

Pode-se, para tanto, valer-se do fato de que faltas em diferentes pontos do alimentador, tendem a produzir valores muito semelhantes de correntes. Assim, utilizam-se dados de falta de um determinado trecho para se obter a distância a faltas em outros trechos. No caso mostrado na figura 6.6, ao se utilizar a rede neural treinada para o alimentador principal, é possível que uma boa indicação para a distância ao ponto de falta, localizado no ponto equidistante indicado (na derivação lateral), seja obtida.

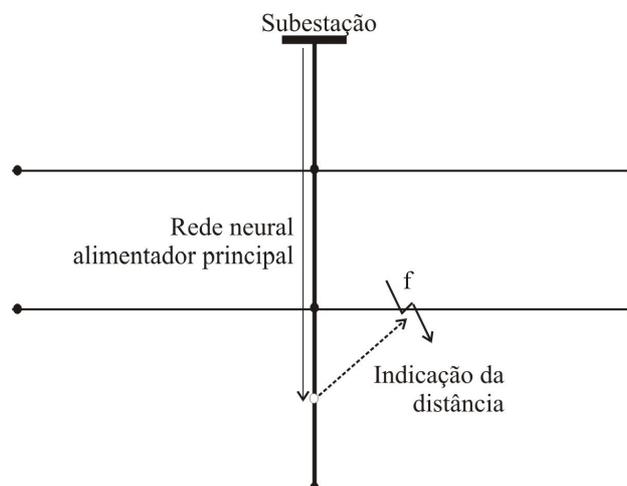


Figura 6.6 - Rede Neural do Alimentador Principal para Falta em Derivação Lateral.

Esse procedimento deve ser avaliado no modelo do alimentador, pois, é sujeito a incertezas, e pode não levar a respostas satisfatórias quando a derivação lateral é formada por um tipo de condutor muito diferente daquele do alimentador principal, por exemplo. Porém, em muitos casos ele pode ser satisfatório e, por isso, será levado em conta nos testes da metodologia.

6.6 CARACTERÍSTICAS DAS REDES NEURAS QUE INTEGRAM A METODOLOGIA

6.6.1 DADOS DE ENTRADA

Conforme já citado, os casos de falta são simulados em um modelo do alimentador onde se deseja implementar a ferramenta de localização de defeitos, e os dados obtidos utilizados no treinamento.

As magnitudes e defasagens das correntes em falta são utilizadas como as variáveis que caracterizam as diferentes localizações e resistências de falta possíveis.

Inicialmente utilizou-se também fasores de tensão nos dados de entrada (COSER et al, 2005c), que também é uma possibilidade viável. A justificativa para o posterior emprego, unicamente, de sinais de corrente se deve a bons resultados obtidos em novos testes. Além disso, eliminam-se fontes adicionais de erros provenientes das medidas e estimações dos fasores de tensão e da dependência dessa variável com a fonte equivalente da subestação no modelo do alimentador.

6.6.1.1 Normalização dos Dados de Entrada

As correntes devem ser normalizadas para que os valores de magnitude e defasagem se encontrem em uma escala razoável para o treinamento. Ao se empregar

fatores de normalização apropriados, consegue-se melhorar a capacidade de mapeamento da função entrada/saída sem perder as características relevantes de variação dos parâmetros em função da localização e da resistência de falta.

O fator de divisão das magnitudes das correntes será feito igual a 10.

Sendo a referência de tensões e correntes nas simulações para compor os conjuntos de treinamento a fase *a*, deve-se subtrair um fator apropriado das medidas de ângulos para o treinamento de redes neurais em faltas nas fases *b* e *c*. Os fatores que devem ser subtraídos dos ângulos serão iguais a 120° para faltas na fase *b* e 240° para faltas na fase *c*. Os fatores acima foram obtidos heurísticamente após se mostrarem adequados nos alimentadores-teste simulados. Aplicações a diferentes alimentadores podem requerer valores diferentes, devendo sempre se visar a eliminação da covariância e a eliminação da média dos valores que irão compor o conjunto de treinamento (HAYKIN, 1994).

6.6.1.2 Valores de Resistência de Falta Para os Conjuntos de Treinamento

Os valores de resistência de falta nas simulações que correspondem às amostras de treinamento são dados na tabela 6.1, sendo que os limites de aplicação prática das redes neurais varia de um alimentador para o outro. Dependendo do carregamento do alimentador, a conveniência do emprego de métodos analíticos pode ser verificada para valores variados da resistência de falta. No capítulo de resultados o limite de emprego de cada método será quantificado para os alimentadores-teste descritos nos anexos, porém, os valores de resistência de falta da tabela podem ser usados para guiar a escolha de conjuntos de treinamento para usuários futuros em qualquer alimentador.

Nota-se na tabela 6.1 que para faltas com valores de resistência menores, o espaçamento entre os mesmos diminui, isso porque as variações de corrente são maiores, então se verificou a necessidade de definir os dados de treinamento, com relação à

resistência de falta, dessa maneira.

Faltas com esses valores de resistência são simulados no início, metade e final do segmento associado à rede neural que estiver sendo treinada, e valores-alvo são apropriadamente definidos para o treinamento supervisionado.

Tabela 6.1 – Valores de Resistência de Falta para as Amostras de Treinamento das Redes Neurais.

<i>Ordem da amostra</i>	<i>Resistência de Falta (Ω)</i>
1	100
2	150
3	200
4	300
5	400
6	500
7	600
8	800
9	1000

Não foram treinadas redes neurais para faltas de impedâncias inferiores a 100Ω , por ter se verificado essa como uma faixa de valores onde a aplicação métodos analíticos desenvolvidos é eficiente.

6.6.2 VALORES-ALVO E PONTOS DE FALTA NOS CONJUNTOS DE TREINAMENTO

Considerando que as faltas para compor os conjuntos de treinamento de cada uma das redes neurais são simuladas no início, metade, e final de cada trecho, os valores 0.1, 0.2, e 0.3 foram escolhidos como valores-alvo que correspondem a essas localizações no processo de treinamento. Dessa forma, se uma rede neural indicar o valor 0,15 na saída, a falta estaria localizada entre o início e a metade do segmento correspondente (por estar

esse valor exatamente no meio de 0,1 e 0,2), conforme ilustra a figura 6.7.

A escolha dos valores-alvo foi resultado de uma série de testes no alimentador-teste descrito no Anexo B, cujo comprimento é muito comum em sistemas de distribuição real, para avaliar a capacidade de generalização das redes e a capacidade de fornecer respostas precisas em unidades de comprimento, em função desses valores-alvo.

A utilização de uma saída contínua obtida através da função de ativação também contínua dos neurônios de saída é uma alternativa que permite com a arquitetura modular proposta obter indicações para a localização da falta em unidades de comprimento qualquer que seja a sua localização no alimentador.

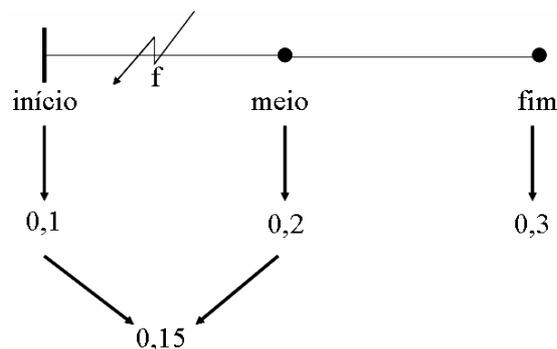


Figura 6.7 – Saída Contínua da Rede Neural para Indicar Distância para a Falta ao Longo de um Segmento.

6.7 PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA DEFINIÇÃO DE DADOS DE TREINAMENTO E DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DAS REDES NEURAI

Para o treinamento das redes neurais, as estratégias sobre quais seriam os dados de treinamento e validação foram definidas após uma série de testes, levando em conta os conceitos apresentados em (FLEXER, 1996) e (HAYKIN, 1994). Eles evidenciam a necessidade de se dispor de conjuntos de validação com dados o quanto possível diferentes

dos dados de treinamento, bem como constituir um conjunto de treinamento que represente bem a função a ser mapeada.

Algumas conclusões interessantes puderam ser obtidas nos testes de diferentes conjuntos de treinamento e validação. A mais interessante se refere à baixa capacidade de extrapolação das redes neurais com o algoritmo de aprendizado via retropropagação de erros empregadas neste problema específico. Apenas 2 em cada 10 casos estudados mostraram que a rede neural poderia responder bem a faltas de 700Ω , quando o conjunto de treinamento só incluía faltas até 500Ω . Então, valores limites devem estar presentes no conjunto de treinamento, já que a interpolação que a rede neural realiza se mostra mais eficiente do que a extrapolação.

A tabela 6.2 traz os principais parâmetros das redes neurais treinadas (valem para qualquer trecho do alimentador e fases envolvidas).

Na camada de entrada são necessários dois neurônios para cada fase em falta, para serem excitados com a magnitude e a fase da corrente nessas fases estimadas nas simulações durante as faltas.

Com relação ao número de neurônios ocultos iniciou-se com duas camadas de 25, reduzindo-se gradativamente esse número até passar por uma única camada de 5 neurônios, onde os erros de treinamento e validação apresentaram-se o mais próximos e, em média, menores. Uma maior diminuição no número de neurônios, entretanto, não conduziu a bons resultados.

A camada de entrada possui dois neurônios, um para a magnitude e outro para o ângulo da corrente na fase em falta. A camada de saída só possui um neurônio que deve informar os valores correspondentes à distância ao ponto de falta.

O erro médio quadrático para a convergência do processo foi ajustado de modo que

as respostas para a localização da falta em unidades de comprimento no conjunto de treinamento atingissem uma precisão com erros inferiores a 1% do comprimento total do trecho para o qual a rede é treinada.

Os demais parâmetros foram escolhidos heurísticamente, sabendo-se que a taxa de aprendizagem deveria assumir valores pequenos, e se mostraram eficientes ao longo de todos os testes, sendo menos determinante ao desempenho das redes do que o número de neurônios e as amostras de treinamento escolhidas.

Tabela 6.2 - Parâmetros Empregados nas Redes Neurais.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor Adotado</i>
Número de neurônios na camada de entrada	2 x número de fases em falta
Camadas intermediárias de neurônios	1
Número de neurônios na camada intermediária	5
Número de neurônios na camada de saída	1
Taxa de aprendizado	10^{-3}
Erro médio quadrático por época de treinamento	10^{-6}

6.8 ESTIMATIVA DO NÚMERO DE AMOSTRAS DE TREINAMENTO

O número total de casos de falta simulados para compor as amostras de treinamento em um alimentador depende, além dos fatores citados anteriormente, do número de níveis de carregamento considerado.

Para uma estimativa do montante total de casos necessários a um determinado sistema, pode-se empregar a equação 6.6. NC é o número de perfis de carregamento a ser incluído no conjunto de treinamento, NR diz respeito ao número de valores diferentes para a resistência de falta adotados, T é o número de trechos que requerem redes neurais

independentes (definido através de um estudo do alimentador, de acordo com a Seção 6.6), e NF_T é o número de fases de cada trecho. O fator 3 que aparece na equação se deve ao fato de se simular faltas no início, metade, e final de cada trecho considerado. Caso se deseje incluir pontos adicionais de simulação ao longo do alimentador, em redes excessivamente longas, no conjunto de treinamento deve-se modificar esse fator conforme desejado.

$$Casos = NC \cdot \left(\sum_I^T 3 \cdot NF_T \cdot NR \right) \quad (6.6)$$

6.9 O PROBLEMA DAS MÚLTIPLAS POSSIBILIDADES PARA A LOCALIZAÇÃO DA FALTA NA METODOLOGIA BASEADA EM REDES NEURAIAS

Conforme vem sendo descrito, na arquitetura modular de redes neurais cada trecho do alimentador está associado a uma determinada rede neural, que pode apontar a distância a faltas nos seus limites de forma correta. O problema é que não se sabe, a priori, qual o trecho em falta do alimentador para acionar a rede neural correta (mesmo problema já abordado em faltas de baixa-impedância).

Da mesma forma que nos métodos analíticos, devem-se investigar inicialmente todos os trechos, ou seja, acionar todas as redes neurais do tipo de falta identificado, obtendo-se assim uma série de soluções candidatas. As soluções incoerentes devem ser eliminadas através da análise da variação do carregamento e dos elementos adicionais descritos no Capítulo 7.

6.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia para localização de faltas de alta-impedância descrita nesse capítulo

é voltada a alimentadores de distribuição típicos, que são repletos de expansões laterais. Ao se treinar redes neurais independentes para determinados trechos do alimentador, se consegue estabelecer uma relação entre a distância ao ponto de falta e a saída contínua das redes neurais, fazendo-se um mapeamento da função que relaciona a distância e a resistência de falta com as correntes medidas na subestação.

Essa metodologia pode ser empregada em conjunto com métodos analíticos para localização de faltas de baixa-impedância constituindo uma ferramenta para localização de faltas das duas categorias, filosofia adotada aqui e que será demonstrada no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 7

IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO COMPUTACIONAL E ELEMENTOS COMPLEMENTARES AOS MÉTODOS PROPOSTOS

7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo descreve a implementação do protótipo computacional com os métodos propostos nos capítulos 5 e 6. O protótipo também inclui os procedimentos iniciais do processo de diagnóstico de faltas comuns a todos os métodos, descritos no Capítulo 4.

Exemplos de diagnósticos a partir dos métodos analíticos e do método baseado em redes neurais serão mostrados, mostrando as diferentes funções disponíveis e a interface gráfica da ferramenta computacional desenvolvida.

Ao final, serão mostrados elementos complementares de grande importância à utilização dos métodos, como maneiras para eliminar múltiplas soluções candidatas para a localização de uma falta, e os principais pontos a serem considerados na implantação do sistema “em campo”.

7.2 PLATAFORMAS DE DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO

Na implementação computacional dos métodos e na simulação de alimentadores para a obtenção de dados aos testes, foram 3 os principais aplicativos computacionais

empregados:

7.2.1 ATP (ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM)

O ATP é um programa de simulação digital que permite analisar transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos em redes elétricas. O programa original foi desenvolvido no final dos anos sessenta pelo Dr. Hermann Dommel. O desenvolvimento do ATP nos últimos anos se deu a partir da contribuição de diversas empresas e universidades do mundo inteiro (SCOTT-MEYER, 1992).

O *ATD/Draw* é um módulo auxiliar que dispõe grande parte dos modelos de componentes em uma interface gráfica, que permite gerar os arquivos de entrada para as simulações. Uma vez gerados os dados de entrada, o programa resolve as equações diferenciais associadas aos diversos componentes da rede elétrica, através da regra trapezoidal de integração.

Entre os principais campos de aplicação do ATP estão:

- Análise de sistemas desbalanceados, como alimentadores de distribuição;
- Análise de transitórios associados a faltas.

Os resultados das simulações no ATP podem ser visualizados graficamente e processados em aplicativos que suportam o formato “.pl4”, os quais não são muito comuns. Por conta disso, os responsáveis pelo grupo de usuários do ATP no Brasil disponibilizam também um aplicativo que permite converter esses dados em outros formatos, o chamado *GTP_Plot*.

Toda a série de aplicativos auxiliares ao ATP, incluindo o *ATP/Draw*, podem ser obtidos através do endereço eletrônico jorgamon@furnas.gov.br, que é do atual

responsável pela distribuição e licenciamento do programa no Brasil (Eng. Jorge Amon Filho, da Furnas Centrais Elétricas S.A.). Todos os programas são gratuitos, desde que o usuário se comprometa a não apoiar o comércio e venda dos aplicativos. Outros grupos de usuários espalhados pelo mundo também fornecem licença para a utilização do programa.

7.2.2 APLICATIVO GTP_PLOT

O GTP_Plot é um aplicativo simples que lê vetores de dados no formato equivalente à saída do ATP e os reproduz em formatos diversos, tais como COMTRADE, arquivos texto, e MATLAB. Assim, as amostras de tensão e corrente resultantes de uma simulação, com tempo total e taxa de amostragem determinados, podem ser processadas nos modelos dos módulos para diagnóstico e localização de faltas que foram implementados em MATLAB.

7.2.3 MATLAB

É uma ferramenta computacional bastante popular entre engenheiros e matemáticos. Embora possua aplicabilidade limitada para programas de porte elevado, é muito útil na construção de protótipos. Diversas funções matemáticas estão disponíveis a partir de comandos simples. Cálculos matriciais podem ser feitos de maneira direta. Funcionalidades adicionais incluem uma biblioteca de funções de redes neurais, e facilidades para geração de interface gráfica com o usuário final (MATLAB, 2002).

7.3 O PRIMEIRO ALIMENTADOR-TESTE

A figura 7.1 mostra o primeiro alimentador-teste utilizado para avaliar os métodos, e que será empregado neste capítulo para demonstrar os diferentes módulos do protótipo

computacional desenvolvido. A descrição detalhada do alimentador é dada no Anexo B.

Essa rede de distribuição foi simulada de modo a possuir as características desejáveis aos estudos desenvolvidos: não-homogeneidade, desbalanceamento significativo, e derivações laterais de uma e três fases.

O comprimento total do alimentador principal é de quinze quilômetros (entre a subestação e o nó 3). Dados de carregamento e impedâncias foram obtidos de DAS (1998). A tensão nominal é de 25kV, entre fases com conexão estrela aterrado. Cada derivação lateral possui um identificador (DL1, DL2, e assim por diante) que será útil nas discussões seguintes.

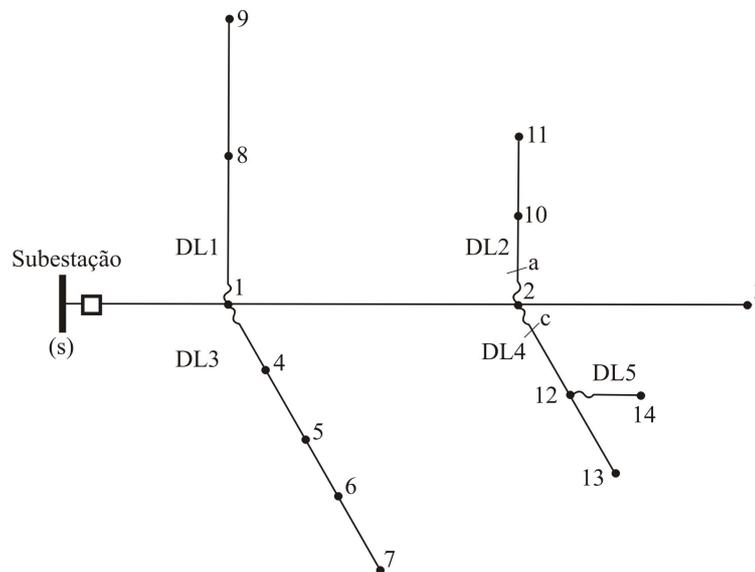


Figura 7.1 Primeiro Alimentador-Teste.

O primeiro alimentador-teste é de pequeno porte possui poucos pontos de carga. É ideal para testes e demonstrações iniciais dos métodos. Posteriormente, eles serão avaliados em um sistema de maior porte e carregamento mais pesado.

7.3.1 MODELO DO PRIMEIRO ALIMENTADOR-TESTE NO ATP/DRAW

A figura 7.2 traz o primeiro alimentador-teste como um conjunto de componentes do módulo computacional *ATP/Draw*. Pode-se ver uma falta monofásica sendo simulada na derivação lateral DL3. Na saída da fonte equivalente da subestação estão os medidores de tensão e corrente nas três fases.

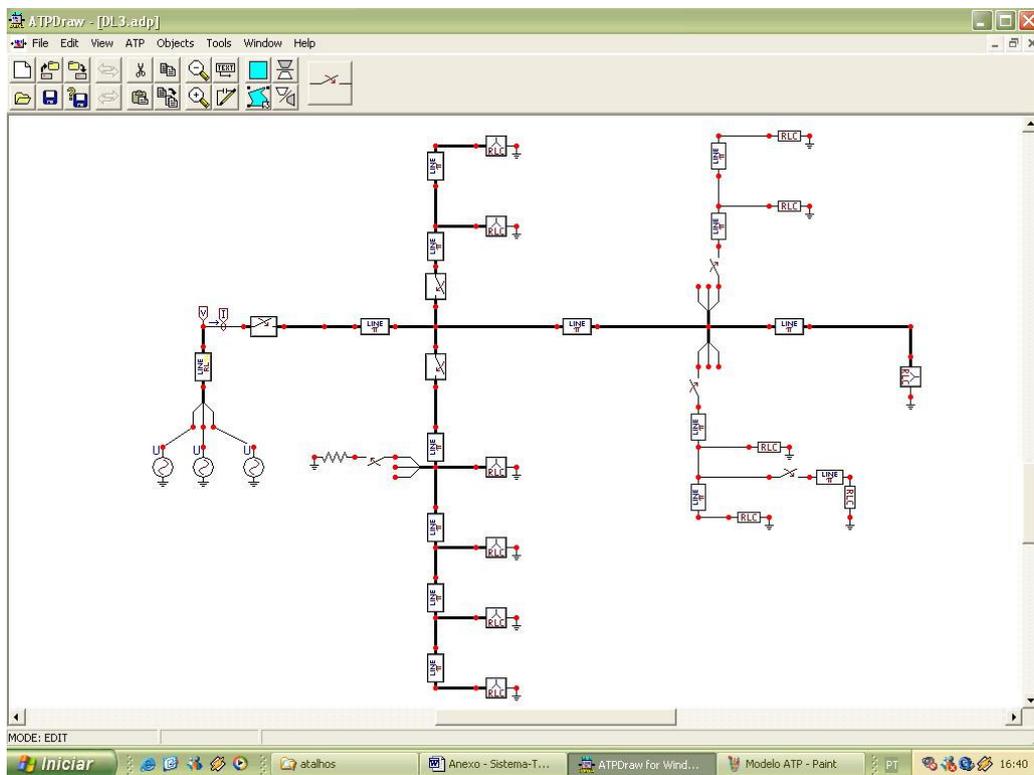


Figura 7.2 - Modelo do Alimentador-Teste no *ATP/Draw*.

As diferentes seções do alimentador são modeladas através de modelos π a parâmetros concentrados, mas que possibilitam considerar acoplamentos mútuos distintos entre as 3 fases (para a modelagem adequada da não-transposição do alimentador). As cargas são modeladas por impedâncias constantes independentes em cada fase. Os demais elementos de chaveamento servem para simular a atuação do sistema de proteção.

7.4 O PROTÓTIPO COMPUTACIONAL

As equações para localização de faltas, as redes neurais para um dado alimentador, e os procedimentos iniciais comuns a todos os métodos foram desenvolvidos em blocos de código que podem ser executados de forma independente, necessitando a instalação do *software* MATLAB. Todos os módulos computacionais estão, entretanto, integrados em um protótipo computacional.

Essa ferramenta, já denominada de F-LOC, irá ser disponibilizada no Laboratório de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Santa Catarina para estudos futuros e demonstrações dos métodos propostos. Uma interface gráfica amigável foi desenvolvida para servir como parâmetro a outros usuários das metodologias e disponibilizar, de uma maneira organizada, todos os códigos implementados com a documentação devida.

7.4.1 INTERFACE GRÁFICA E PROCESSAMENTO DOS MÓDULOS

A tela inicial do F-LOC é mostrada na figura 7.3. Ela possui, basicamente, elementos gráficos de apresentação, dois menus no canto esquerdo superior, e o botão “avançar”.

Ao acionar o botão *avançar*, o usuário deve carregar um arquivo com os dados amostrados das formas de onda de tensões e correntes a serem analisadas (os quais, até o presente momento, vêm de simulações no ATP, convertidas pelo programa GTP_PLOT). Para isso, é disponibilizada uma tela de busca de arquivos, no padrão do sistema operacional *Windows* mostrada na figura 7.4. O formato que os arquivos devem possuir, para que os cálculos sejam iniciados é detalhado em um sistema de ajuda, abordado posteriormente. Arquivos possuindo dados em formatos incompatíveis com o padrão atual adotado no protótipo são rejeitados, e uma nova entrada do usuário é requisitada.



Figura 7.3 - Tela Inicial do Programa F-LOC.

Logo após carregar o arquivos de dados, o F-LOC aciona os diversos blocos de código do sistema para diagnóstico de falhas, na ordem do *fluxograma* da figura 7.5 comentada a seguir:

- *Amostras de tensões e correntes*: dentro do intervalo de simulação analisado, as amostras das tensões e correntes nas três fases do alimentador-teste são atribuídas a variáveis globais para posterior análise;
- *Filtragem (via algoritmo dos mínimos quadrados) e fasores V & I*: esse estágio é processado continuamente ao longo do intervalo de dados analisado. Os fasores da componente fundamental são estimados com o conjunto de amostras de tamanho pré-definido, em função da janela de tempo (que se desloca ao longo dos sinais) e da taxa de amostragem;



Figura 7.4 - Tela para Carregar Arquivo de Dados.

- *Deteção de faltas:* à medida que o algoritmo dos mínimos quadrados é processado, para cada nova amostra incluída na sua janela de tempo, uma rotina para detectar a condição de falta, conforme definido no Capítulo 4, é executada após a estimação dos fasores. O instante de tempo da deteção serve de referência ao armazenamento dos fasores de tensões e correntes antes, durante, e depois da eliminação da falta;
- *Armazenamento dos fasores de tensão e corrente:* caso uma falta seja detectada, os fasores do período “em falta” são obtidos com a janela de tempo do algoritmo dos mínimos quadrados posicionada em 3 ciclos após a deteção da mesma. Fasores de 1 ciclo anterior à incidência da falta também são armazenados, correspondendo aos dados “pré-falta”. Fasores estimados após a

interrupção da corrente de falta pelo sistema de proteção, que serão importantes para análises posteriores, são armazenados como dados “pós-falta”;

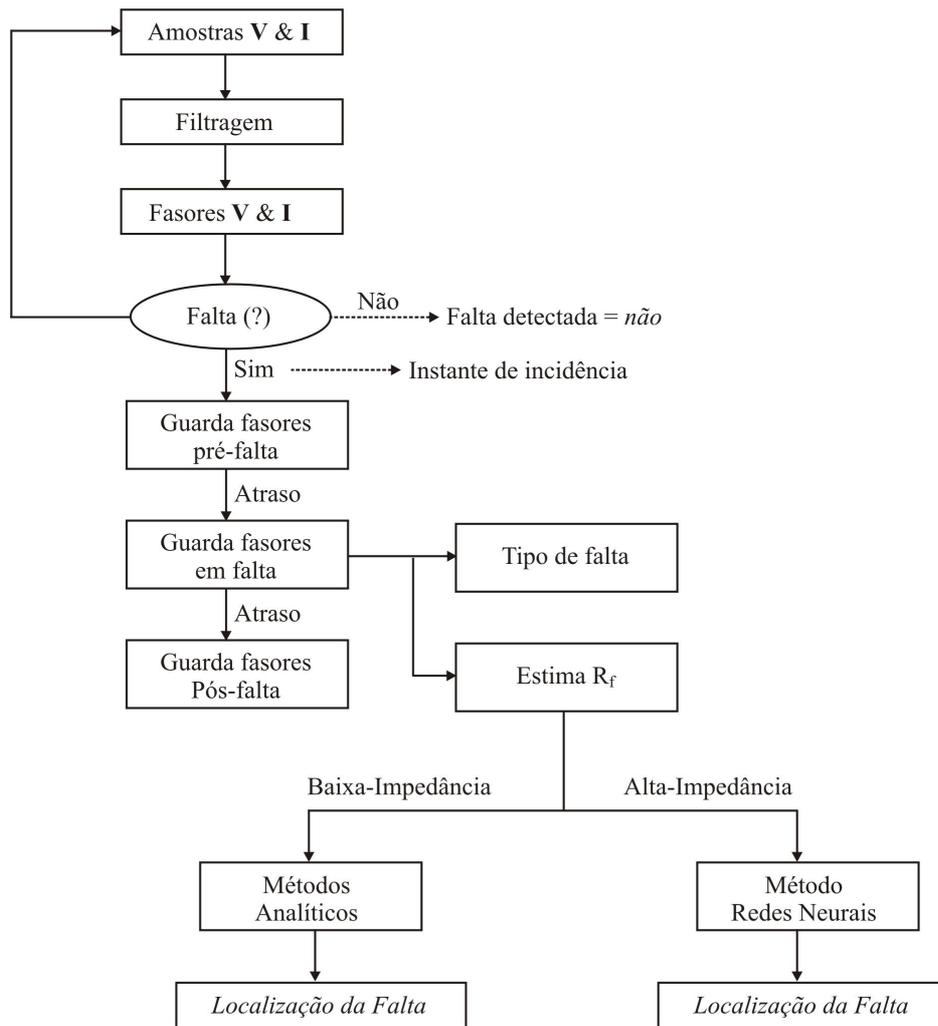


Figura 7.5 – Fluxograma da Ferramenta Computacional.

- *Tipo de falta:* a identificação das fases envolvidas no defeito é obtida em função dos dados “em falta” e dos conceitos apresentados no Capítulo 4;
- *Estimativa da resistência de falta (R_f):* a discriminação em faltas de alta e baixa-impedância é feita a partir da ordem de grandeza da resistência de falta

definida no Capítulo 4. Essa estimativa irá determinar se a localização será feita pelos métodos analíticos ou pelo método baseado em redes neurais (divisão do processamento, mostrada no fluxograma da figura 7.5);

- *Cálculo da localização da falta:* A localização da falta é fornecida como variável de saída ao final do diagnóstico. Algumas considerações ainda serão apresentadas sobre a possibilidade de múltiplas estimativas para a localização de uma mesma falta, possibilidade também contemplada pelo programa F-LOC.

7.5 DEMONSTRAÇÕES

Esta seção demonstra o funcionamento do F-LOC, incluindo algumas funções importantes que complementam as rotinas de cálculo e exemplos de faltas de baixa e alta-impedância.

Para que usuários futuros da ferramenta entendam seu funcionamento e possam testá-la a partir de novos dados obtidos em simulações no ATP, informações básicas sobre as variáveis mais importantes são fornecidas em uma tela de ajuda, que aparece na figura 7.6. Pode-se ver o nome que os vetores contendo as variáveis globais devem possuir, pois foram assim declaradas nos códigos. Existe também um ponteiro para a descrição de cada um dos métodos que compõe a ferramenta, que nada mais é do que um arquivo contendo os textos dos capítulos 5 e 6.

O usuário possui acesso aos códigos comentados que fazem parte da instalação do programa, podendo ajustar qualquer parâmetro de acordo com seu interesse, como a taxa de amostragem e a janela total de simulação, que foram mantidas fixas conforme os dados da figura 7.6 ao longo dos testes e nos exemplos mostrados a seguir.

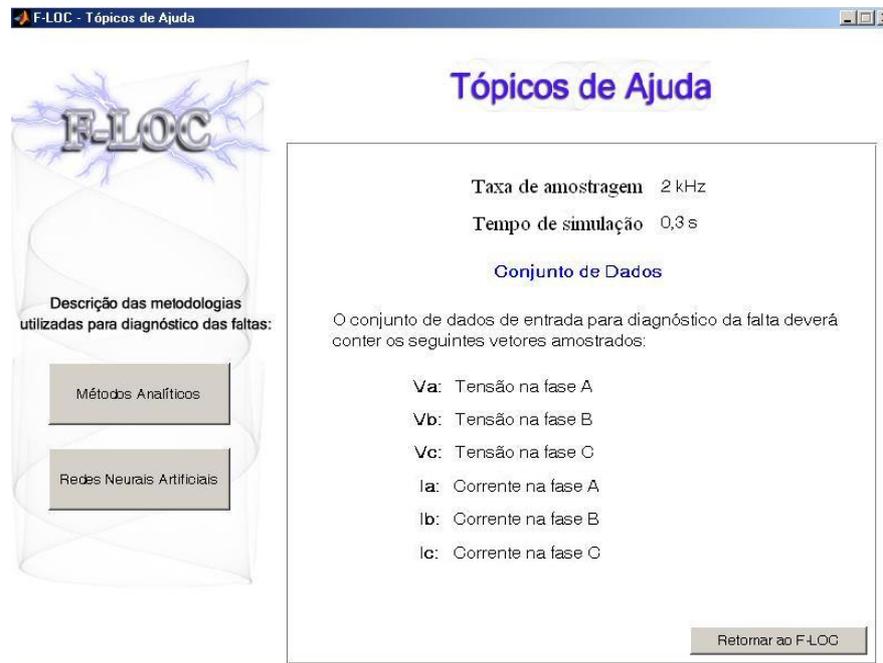


Figura 7.6 – Tela dos Tópicos de Ajuda.

7.5.1 FALTA DE BAIXA-IMPEDÂNCIA

Para demonstrar o funcionamento do F-LOC no diagnóstico de uma falta de baixa-impedância, a figura 7.7 mostra a tela de oscilografia para um defeito com resistência de 5Ω a 5 km da subestação, no primeiro alimentador-teste, após os dados terem sido carregados pelo usuário.

Nos menus localizados na parte esquerda das telas do F-LOC, o usuário pode acessar outras informações de seu interesse além da tela da oscilografia. No botão *diagnóstico da falta*, que é o principal deles, é gerada a tela mostrada na figura 7.8.

Nessa funcionalidade, é inicialmente informado se o sinal analisado é ou não faltoso. O limiar para se assumir a condição de falta, do ponto de vista do F-LOC, em cada fase e na sequência zero, é um aumento instantâneo de 100% na magnitude da variável. As

fases envolvidas no defeito também são indicadas.

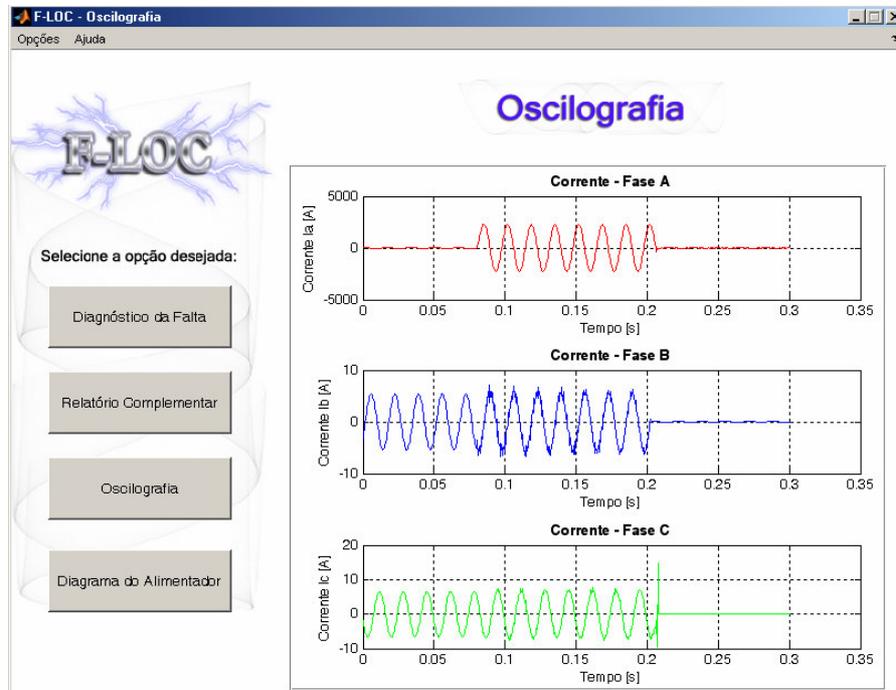


Figura 7.7 – Tela de Oscilografia para Falta de Baixa Impedância.

As estimativas para a corrente na fase a , através do algoritmo dos mínimos quadrados, indicam que ela se elevou de 5,5 A (antes da falta) para 2265 A (durante a falta), sendo o defeito detectado no instante $t = 0,08s$. Com esses valores, a ordem de grandeza da resistência de falta assume um valor de 7,26 Ω (esse valor não é igual à resistência de falta que aparece na tela), caracterizando uma falta de baixa-impedância e acionando os métodos analíticos para sua localização.

O valor da resistência de falta que aparece na tela é obtido a partir das equações do método 2. No ponto em que o algoritmo converge, a parte real da expressão para a impedância de falta de acordo com as fases envolvidas (tabela 5.3) fornece esse valor.

Dois valores para a distância ao ponto de falta de baixa-impedância são sempre

mostrados pelo F-LOC na tela do diagnóstico (dados pelos métodos 1 e 2). O usuário que dispõe de um modelo de alimentador pode simular faltas com posições conhecidas no mesmo, e avaliar a precisão de cada um dos métodos analíticos no seu sistema.



Figura 7.8 – Tela de Diagnóstico de Falta de Baixa-Impedância.

Um novo ponteiro para a descrição de cada método (redundante ao que aparece na tela de ajuda) aparece ao lado das respostas obtidas em cada um deles.

7.5.2 FALTA DE ALTA-IMPEDÂNCIA

A figura 7.9 mostra as formas de onda de corrente nas três fases para uma falta de 500Ω , localizada no alimentador principal a 5 km da subestação. Pode-se notar o menor incremento da corrente na fase *a*, contudo, sendo detectada uma falta a partir da elevação da corrente nessa fase em $t=0,08s$ (a variação é de 5,5 A para 46 A).

A figura 7.10 ilustra o diagnóstico da falta de alta-impedância descrita acima.

A ordem de grandeza da resistência de falta é de $502,15\Omega$. Essa estimativa está muito próxima do valor simulado. Isso ocorre para faltas de alta-impedância porque a impedância dos condutores se torna relativamente insignificante frente à resistência de falta, então a resistência vista no início do alimentador (procedimento sugerido no Capítulo 4) caracteriza bem a resistência de falta em uma ampla faixa de valores (até o ponto onde ela se torna comparável à impedância das cargas). Esse valor de resistência de falta aparece na tela de diagnóstico, juntamente com as demais informações já citadas para faltas de baixa-impedância, e a distância ao ponto de falta obtida pela rede neural previamente treinada para o alimentador principal. Note-se que na interface do F-LOC o método baseado em redes neurais é referido como *método 3* (para facilitar o entendimento do usuário).

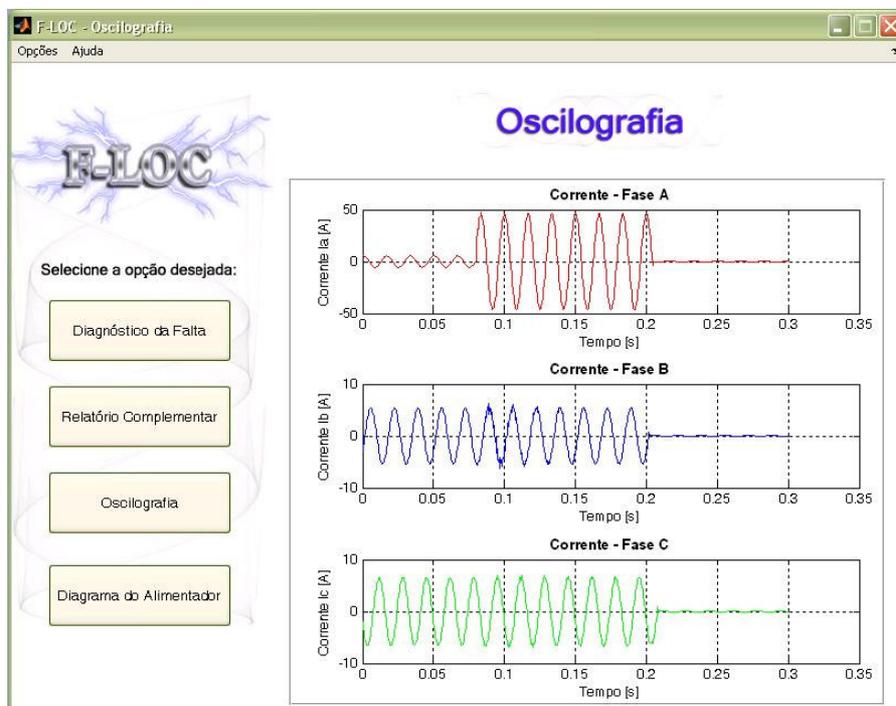


Figura 7.9 – Tela de Oscilografia para Falta de Alta-Impedância.



Figura 7.10 – Tela de Diagnóstico de Falta de Alta-Impedância.

7.5.3 DIAGRAMA DO ALIMENTADOR

Na opção *diagrama do alimentador*, a localização mais provável da falta é indicada para facilitar o trabalho das equipes de campo. No exemplo da figura 7.11, se está mostrando a falta de baixa-impedância que foi simulada em 5 km da subestação no alimentador principal, e o deslocamento do indicador no sistema de coordenadas da figura (um ponto com a letra *f*).

7.5.4 RELATÓRIO COMPLEMENTAR

O relatório complementar mostrado na figura 7.12, corresponde à falta de baixa-impedância discutida anteriormente, informado duas outras duas localizações possíveis para a falta no alimentador (obtidas pelo método 1, que é a saída padrão para o relatório complementar).

A localização mais provável da falta no alimentador principal foi assumida inicialmente pelo fato de toda a carga do alimentador ter sido desligada após a falta (conforme será discutido na seção seguinte). Entretanto, os outros dois pontos indicados no relatório complementar podem ser considerados como possíveis da ocorrência do defeito. Eles estão nas derivações laterais 1 e 3 e são equidistantes.

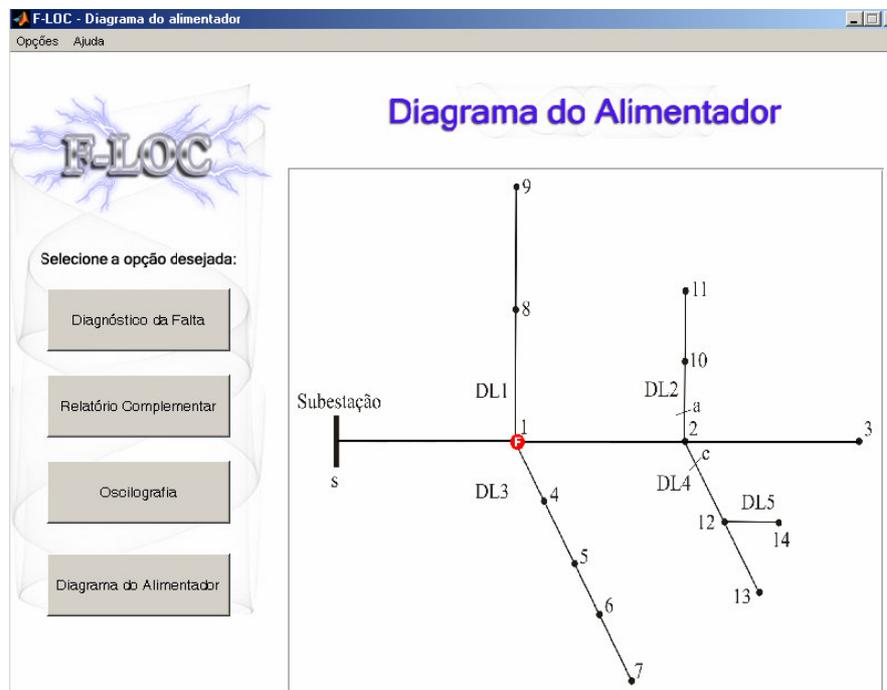


Figura 7.11 – Diagrama do Alimentador com Indicação da Localização mais Provável da Falta de Baixa-Impedância.

Esse fato ocorreu (a) pelas duas localizações serem viáveis fisicamente e (b) pelos condutores das derivações laterais 1 e 3 serem iguais e possuírem o mesmo tipo de espaçamento do alimentador principal, como pode ser verificado no Anexo B. Assim, a resposta que o método 1 retorna ao investigar esses trechos é igual à dada para o alimentador principal. Contudo, o que se pretende enfatizar aqui é que o F-LOC lista todas

as localizações possíveis para a falta no relatório complementar, embora apenas a localização mais provável apareça na opção do diagrama do alimentador.

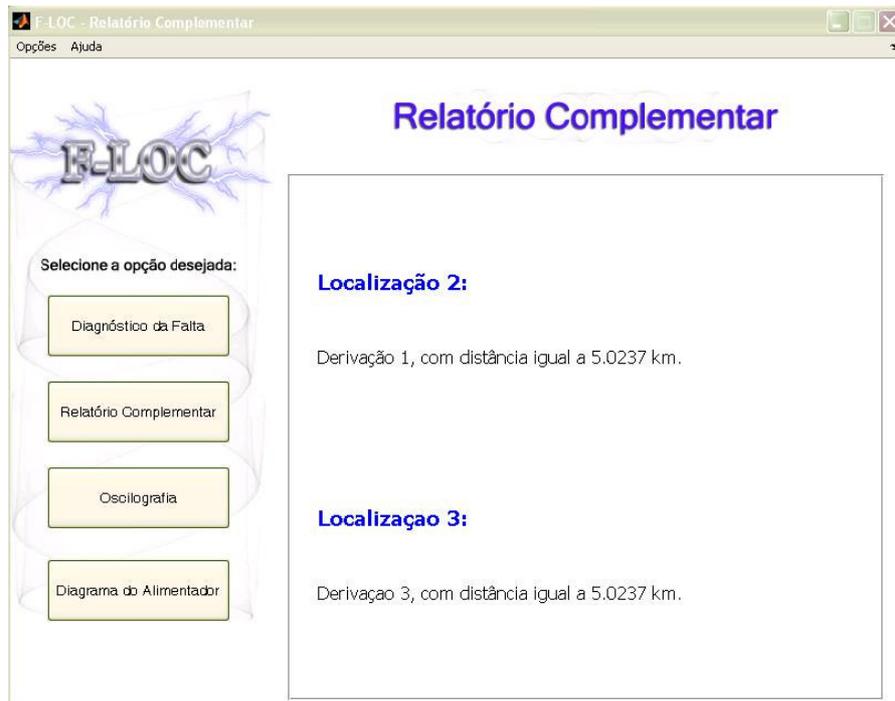


Figura 7.12 – Relatório Complementar para a Falta de Baixa-Impedância.

7.6 ELEMENTOS COMPLEMENTARES AOS MÉTODOS PROPOSTOS

É importante descrever alguns elementos complementares, mas relevantes à implantação do F-LOC em um sistema real.

7.6.1 ELEMENTOS PARA ELIMINAÇÃO DE MÚLTIPLAS SOLUÇÕES

A necessidade de elementos para eliminação de múltiplas soluções para a localização das faltas já vem sendo abordada em discussões precedentes, e cerca qualquer método para localização de faltas em alimentadores a partir de um único terminal. Além da análise da variação da carga (motivo pelo qual o F-LOC armazena dados pós-falta), dois

procedimentos adicionais também serão abordados: a análise de chamadas de consumidores a partir da sua conectividade com a rede de distribuição, e o emprego de *sensores de corrente de falta*. Em sistemas de distribuição automatizados, indicações para a localização de uma falta podem ser obtidas também através do estado de chaves instaladas no alimentador que pode ser monitorado na subestação (GOHOKAR et al. 2005). De acordo com a proposta do trabalho descrito nesta tese, a relação dos métodos complementares a seguir, é fiel a um critério mais realista com soluções de baixo custo.

7.6.1.1 Análise da Variação da Carga

No primeiro alimentador-teste pode-se fazer uma análise rápida do impacto do desligamento de cada uma das derivações laterais pelo sistema de proteção na ocorrência de faltas permanentes, os cenários de variação de carregamento esperados ilustrados na figura 7.13. A variação está sendo observada na fase *a*, sendo que o alimentador opera inicialmente em um regime de carga moderado, com 50% da potência nominal total das cargas sendo atendida.

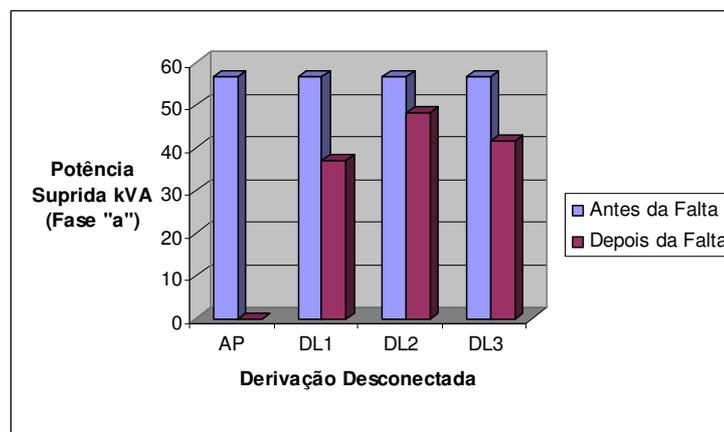


Figura 7.13 - Cenários de Variação do Carregamento no Primeiro Alimentador-Teste.

Se uma falta permanente ocorrer no alimentador principal e for corretamente

isolada pelo sistema de proteção, toda a carga do alimentador deve ser desconectada (cenário AP, na figura), o que indica que a localização da falta mais provável está associada a esse trecho. Isso ocorreu nos dois casos mostrados anteriormente e pode ser visualizado nas telas de oscilografia das figuras 7.7 e 7.9, onde a corrente suprida ao alimentador cai a zero após alguns ciclos de incidência da falta. Por essa razão, a localização da falta no alimentador principal foi tida pelo F-LOC como a mais provável.

Sempre que a falta ocorrer no alimentador principal, como naqueles casos, todas as derivações laterais para as quais os algoritmos retornam respostas fisicamente viáveis também são consideradas como possíveis regiões para a localização da falta pelo F-LOC, em função da possibilidade de falha na operação dos elos fusíveis (condição freqüentemente observada em casos reais).

Os demais cenários mostrados na figura 7.13 indicam a variação do carregamento na fase em falta simulando o desligamento pelo esquema de proteção de cada uma das outras três derivações laterais que incluem a fase *a* (DL1, DL2, e DL3). É possível notar que a maior variação de carga ocorre ao se desligar DL1 (onde a carga suprida decresce em torno de 40%), devido ao montante total de carga instalado nesse trecho que é significativamente maior que os outros dois.

A correspondência entre a carga desligada após a atuação da proteção e a potência nominal instalada determina o trecho em falta mais provável. O programa F-LOC automatiza essa análise, listando sempre uma série de localizações candidatas para a falta além da mais provável que aparece em primeiro plano. Todas as localizações candidatas, em ordem de probabilidade de ocorrência, constam no relatório complementar. A ordem é sempre estabelecida em função da carga instalada em cada trecho e da variação de carga.

Pode-se notar que as características de carregamento do alimentados são dados

importantes e necessários à implantação dessa funcionalidade. A partir daí, outros elementos poderiam auxiliar os usuários do F-LOC a derivar a real localização da falta em um caso real, conforme segue.

7.6.1.2 Análise de Chamadas de Consumidores

Na ocorrência de faltas permanentes os operadores das centrais de tele-atendimento das empresas distribuidoras recebem um número elevado de chamadas telefônicas para reclamar da perda do fornecimento. Essas informações são passadas para as equipes responsáveis pela operação e eventual restabelecimento do sistema. Dado que a conectividade dos consumidores aos respectivos transformadores de distribuição é conhecida na maioria dos casos, essas reclamações são bem-vindas para eliminar soluções candidatas para a localização da falta.

Também existem abordagens mais simples para o problema, como a sugerida por LAVERTY et al., (1999), onde a análise é feita do nível dos consumidores em direção à subestação. No exemplo da figura 7.14, no caso de somente os consumidores indicados telefonarem para os operadores, se pode inferir que a falta ocorreu na derivação DL1 por queima do elo fusível, pois todas as chamadas são provenientes dos consumidores identificados por “grupo 1”. Caso algum consumidor do grupo 2 também telefonasse, poderia se pensar que a falta ocorreu no alimentador principal, pelo fato de transformadores de mais de uma derivação lateral terem sido desconectados. Chamadas de consumidores conectados a um único transformador podem indicar que esse equipamento está fora de serviço.

Em qualquer caso, a análise de chamadas de consumidores é um bom recurso para a eliminação de múltiplas soluções candidatas para a localização da falta.

A análise de chamadas de consumidores na distribuição constitui uma linha de pesquisa com desenvolvimentos recentes voltados à utilização de técnicas de inteligência artificial (LIU et al., 2002).

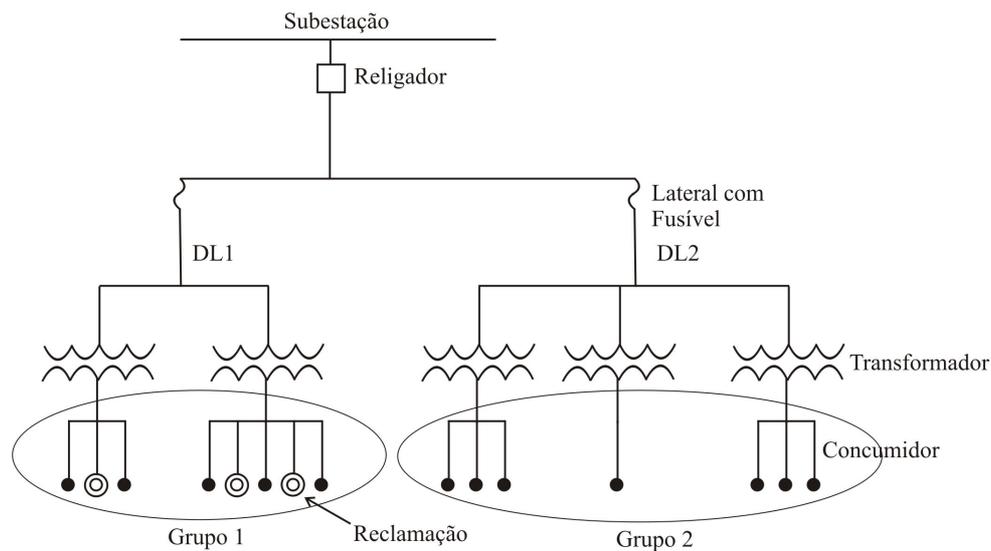


Figura 7.14 - Conectividade de Consumidores para Análise de Chamadas.

7.6.1.3 Sinalizadores de Corrente de Falta

Outra possibilidade para a eliminação de múltiplas soluções candidatas, que poderia ser utilizada em conjunto com o F-LOC, é o uso de sinalizadores de corrente de falta. Tais equipamentos indicam a ocorrência de sobrecorrentes anormais além do ponto em que estão instalados, emitindo um sinal luminoso no local. Informações técnicas podem ser obtidas a partir dos principais fabricantes de equipamentos para sistemas elétricos, sendo que no endereço eletrônico <http://www.selinc.com/faultindicators> (último acesso em: dezembro/2005) existem diversos modelos disponíveis.

Devem-se alocar os indicadores estrategicamente no alimentador, para que a conversão das múltiplas estimativas para a real localização da falta possa ser feita, guiando

corretamente as buscas das equipes que irão investigar o problema.

A figura 7.15 mostra um arranjo de detectores de falta ideal para o primeiro alimentador-teste. Pode-se notar que existe basicamente um indicador instalado no início de cada nova expansão lateral.

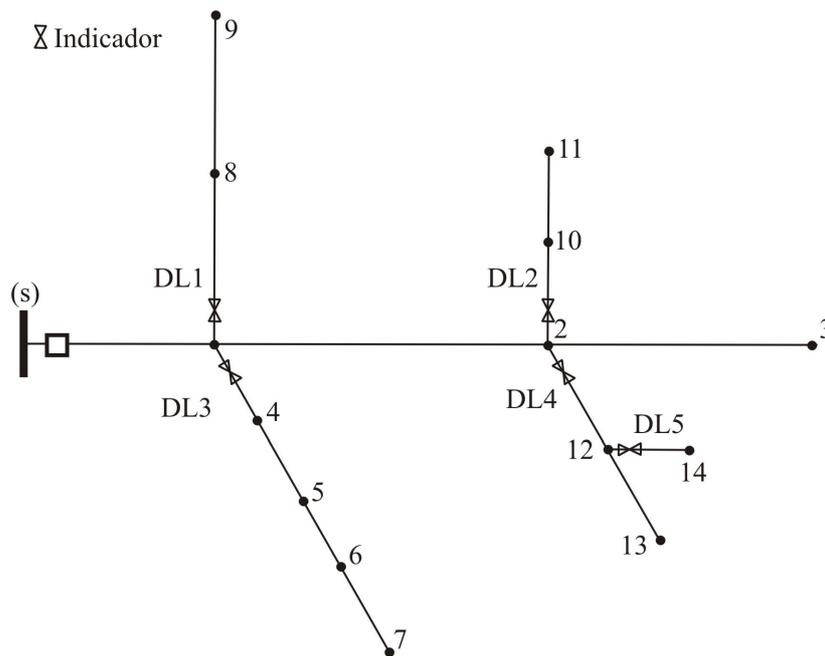


Figura 7.15 - Indicadores de Corrente de Falta.

7.6.2 ELEMENTOS PARA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA “EM CAMPO”

No diagrama de blocos da figura 7.16, são mostrados os principais componentes de um sistema para localização de faltas que utilizaria o programa F-LOC para a análise de sinais e eventual localização da falta, na detecção de perturbações.

Transformadores de tensão e corrente (TPs e TCs) são empregados para reduzir os níveis de tensão e corrente do alimentador a valores padronizados (como 110V e 5A).

Placas de aquisição de sinais e a conversão analógica/digital podem requerer

condicionamento dos sinais a níveis de tensão e corrente inferiores às saídas dos transformadores de instrumentos. Esse estágio também está associado à isolação elétrica da placa com relação aos secundários dos transformadores de instrumentos. Nesse ponto, os sinais digitalizados, amostrados a uma taxa predefinida, podem ser transferidos a um servidor dedicado na subestação, onde os módulos computacionais do sistema localizador de faltas devem estar disponíveis.

Para a aplicação específica do programa F-LOC, na forma como foi desenvolvido em protótipo, é desejável que os dados adquiridos pelos transformadores de instrumentos possam ser analisados no formato de dados compatível com o MATLAB. Porém, os usuários das metodologias podem empregar linguagens de programação de nível mais baixo, mas com maior capacidade de processamento, elaborando suas próprias ferramentas computacionais a partir dos algoritmos propostos.

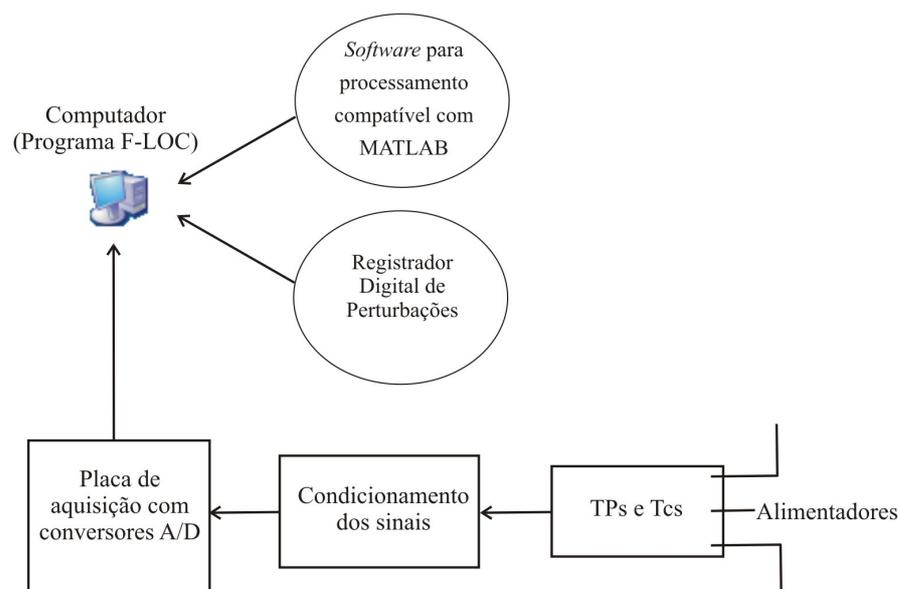


Figura 7.16 - Diagrama de Blocos de um Sistema Localizador de Faltas.

Equipamentos comerciais, tais como o pacote *LabView* (INFO-LABVIEW, 2005), já permitem a aquisição dos dados, o registro de perturbações, e a conversão de dados para MATLAB, o que é bastante conveniente.

É importante citar que muitas empresas distribuidoras já possuem funções de oscilografia nas subestações de maior porte. Dessa forma, o custo para a implantação dos métodos propostos, baseados em estimativas das componentes fundamentais de tensões e correntes, se torna reduzido.

Relés digitais para proteção de alimentadores, mais modernos, como o popular *F60* da *General Eletric* (GE SISTEMAS INDUSTRIAIS, 2005), também dispõem de funcionalidades como registradores digitais de perturbações e oscilografia. Alguns possuem seus próprios módulos para localização de faltas, normalmente baseados na medida da componente reativa da impedância. Existe a possibilidade da utilização dos dados provenientes dos relés, para a utilização dos métodos propostos aqui, sendo necessário, nesses casos, obter informações sobre o formato de dados dos *softwares* que acompanham os relés, a fim de disponibilizá-los para utilização nos módulos computacionais implementados.

7.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os aspectos mais relevantes da implementação computacional e elementos para implantação em campo do protótipo computacional que integra os métodos propostos foram descritos neste capítulo. Apenas alguns resultados foram apresentados, em caráter demonstrativo, para apresentar as diversas funções disponíveis no F-LOC.

Entretanto, é preciso fazer uma análise ostensiva da precisão dos módulos

computacionais que calculam a distância ao ponto de falta, o que é objeto do próximo capítulo.

CAPÍTULO 8

RESULTADOS DE TESTES DOS MÓDULOS PARA CÁLCULO DA DISTÂNCIA AO PONTO DE FALTA

8.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo descreve resultados de uma série de testes dos métodos propostos, visando avaliar o desempenho, em especial, dos módulos para o cálculo da distância ao ponto de falta: a exatidão das respostas, como se comportam os métodos com o aumento da resistência e da distância ao ponto de falta, e a sua sensibilidade a erros nos parâmetros adotados.

Os métodos foram avaliados em dois modelos de alimentadores distintos. Nos métodos analíticos foram feitas comparações com os resultados do método da componente reativa da impedância. No método baseado em redes neurais uma análise da magnitude dos erros de treinamento e validação é apresentada.

8.2 RESULTADOS DOS ALGORITMOS ANALÍTICOS

Nos resultados mostrados abaixo apenas a solução correspondente ao trecho em falta correto vai ser apresentada em cada caso. O problema das múltiplas soluções candidatas para esse alimentador já foi discutida no capítulo precedente, com os elementos disponíveis para a eliminação das mesmas. Com isso se pretende fazer uma análise voltada para a precisão dos métodos no cálculo da distância ao ponto de falta. Os erros

apresentados nas tabelas de resultados serão expressos em percentuais do comprimento total do alimentador (%C.T.).

8.2.1 MÉTODO 1

Os primeiros resultados da aplicação do método 1 (que é direto) no primeiro alimentador-teste são mostrados na tabela 8.1 (faltas *a-t*) e na tabela 8.2 (faltas *b-c-t*).

Tabela 8.1 - Resultados para Faltas *a-t* via Método 1.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f</i> (Ω)	<i>Distância</i> (km)	<i>Valor</i> <i>Obtido (km)</i>	<i>Erro</i> (% C. T.)
Nó 1	1	5,000	5,002	0,01
	50	5,000	5,109	0,73
	100	5,000	5,217	1,45
Nó 2	1	10,000	10,004	0,03
	50	10,000	10,113	0,75
	100	10,000	10,224	1,49
Nó 3	1	15,000	15,002	0,01
	50	15,000	15,095	0,63
	100	15,000	15,188	1,25
Nó 10	1	12,500	12,496	-0,03
	50	12,500	12,558	0,39
	100	12,500	12,620	0,80

Nos diferentes pontos de falta e valores de resistência associada ao defeito analisados pode-se constatar que:

- A precisão dos resultados é satisfatória para os dois tipos de falta, todos os erros são inferiores a 1,5% do comprimento total do alimentador principal (que é de quinze quilômetros);

- O maior erro obtido ocorre para uma falta do tipo fase-terra de 100Ω a dez quilômetros da subestação, o que certamente se deve à elevada resistência de falta,
- A precisão dos resultados não demonstra sofrer grandes influências com o aumento da distância ao ponto de falta.

Tabela 8.2 - Resultados para Faltas *b-c-t* via Método 1.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f</i> (Ω)	<i>Distância</i> (km)	<i>Valor Obtido</i> (km)	<i>Erro</i> (% C. T.)
Nó 1	1	5,000	5,001	0,01
	50	5,000	5,055	0,33
	100	5,000	5,109	0,72
Nó 2	1	10,000	10,000	0
	50	10,000	10,047	0,31
	100	10,000	10,094	0,62
Nó 3	1	15,000	14,995	0,03
	50	15,000	15,027	0,18
	100	15,000	15,060	0,40
Nó 4	1	7,500	7,500	0
	50	7,500	7,548	0,32
	100	7,500	7,596	0,64

8.2.1.1 Comparações com o método da componente reativa da impedância

Os resultados do método 1 foram comparados aos do método da componente reativa da impedância em algumas simulações. Valores adicionais de resistência de falta foram incluídos, pois esse é o principal parâmetro que influencia a precisão das estimativas. As faltas foram simuladas no nó 2, situado a 10 km da subestação. Os resultados são apresentados na tabela 8.3.

Os dados da tabela são ilustrados no gráfico da figura 8.1. Pode-se notar que os

erros do método da componente reativa crescem muito a partir de resistências de falta acima de 75Ω (fornecendo algumas estimativas absurdas). Por outro lado, o método 1 se mostra pouco influenciado pela resistência de falta até 200Ω (isso é verdade para o alimentador analisado, não é um limite de resistência válido para qualquer alimentador). Bons resultados são obtidos também para faltas de baixa-impedância, onde os dois métodos fornecem boas respostas.

Tabela 8.3 - Comparação de Resultados entre o Método 1 e o Método Componente Reativa da Impedância no Primeiro Alimentador-Teste.

R_f (Ω)	Método 1 (km)	Erro (% C. T.)	Componente Reativa (km)	Erro (% C. T.)
1	10,004	0,03	9,988	-0,08
10	10,024	0,16	9,977	-0,15
50	10,113	0,75	10,076	0,51
75	10,169	1,12	10,256	1,70
100	10,224	1,49	10,521	3,47
150	10,333	2,22	11,296	8,64
200	10,440	2,93	12,375	15,83

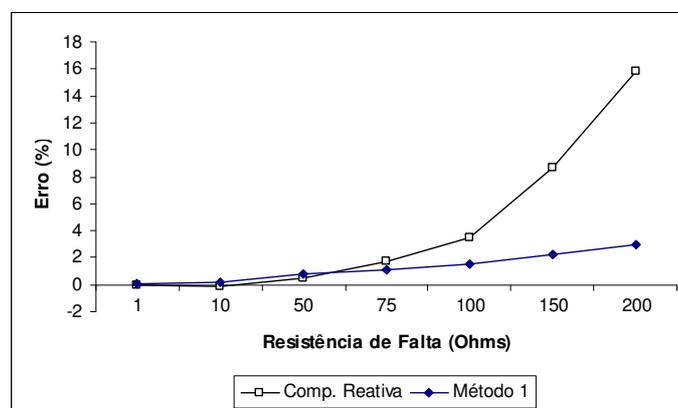


Figura 8.1 - Comparação de Resultados entre Método 1 e Método da Componente Reativa da Impedância no Primeiro Alimentador-Teste.

8.2.2 MÉTODO 2

O método 2 (que é iterativo) teve sua precisão avaliada para os mesmos testes do método 1. Na tabela 8.4, são mostrados resultados para faltas $a-t$, e na tabela 8.5 resultados para faltas $b-c-t$. Os principais aspectos observados ao longo das simulações foram os seguintes:

- Também para este método, a precisão das estimativas é satisfatória para os dois tipos de falta, o maior erro obtido é de 1,36% do comprimento do alimentador principal (ou 204 metros);
- O aumento nos erros está mais associado ao aumento da distância ao ponto de falta do que ao aumento da resistência de falta. Entretanto, em análises posteriores se verificou que a precisão dos resultados passa a não ser satisfatória para resistências de falta acima de 300Ω (para o qual os cálculos resultam em erros acima de 2% do comprimento total do alimentador);
- A ordem de grandeza dos erros é similar àquela obtida para o método 1.

O método 2, por conter um processo iterativo e cálculo de variáveis de seqüência, tem requisitos maiores de tempo de processamento e alocação de memória do que o método 1 (cujo tempo de processamento é desprezível). Os cálculos em um computador de 1,67 GHz e 480 MB de RAM levam entre 8 e 10 segundos (considerando o processo de cálculo da distância o ponto de falta para um trecho em análise no alimentador).

Esse fato leva à conclusão de que ele é menos indicado para aplicações onde tais requisitos são mais importantes, como em relés digitais, por exemplo. Mas a boa precisão dos resultados dessa formulação, dada a representação de cargas que foi adotada, a torna uma alternativa bastante interessante no contexto dos localizadores digitais de falta.

Tabela 8.4 - Resultados para Falhas $a-t$ via Método 2.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f</i> (Ω)	<i>Distância</i> (km)	<i>Valor</i> <i>Obtido (km)</i>	<i>Erro</i> (%C. T.)
Nó 1	1	5,000	5,068	0,45
	50	5,000	5,068	0,45
	100	5,000	5,067	0,45
Nó 2	1	10,000	10,138	0,92
	50	10,000	10,080	0,53
	100	10,000	10,021	0,14
Nó 3	1	15,000	15,204	1,36
	50	15,000	15,069	0,46
	100	15,000	14,933	-0,51
Nó 10	1	12,500	12,596	0,64
	50	12,500	12,509	0,06
	100	12,500	12,421	-0,52

Tabela 8.5 Resultados para Falhas $b-c-t$ via Método 2.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f</i> (Ω)	<i>Distância</i> (km)	<i>Valor</i> <i>Obtido (km)</i>	<i>Erro</i> (% C. T.)
Nó 1	1	5,000	5,037	0,25
	50	5,000	5,023	0,15
	100	5,000	4,979	0,14
Nó 2	1	10,000	10,076	0,50
	50	10,000	10,032	0,21
	100	10,000	9,959	-0,27
Nó 3	1	15,000	15,111	0,74
	50	15,000	15,029	0,19
	100	15,000	14,920	-0,53
Nó 4	1	7,500	7,557	0,38
	50	7,500	7,524	0,16
	100	7,500	7,465	-0,23

O usuário dos métodos pode comparar os resultados dos métodos 1 e 2, e escolher a melhor opção para um determinado alimentador ou aplicação de interesse.

8.2.2.1 Comparações do Método 2 com o Método da Componente Reativa da Impedância

As mesmas comparações com o método da componente reativa da impedância feitas para o método 1, foram feitas para o método 2. Novamente, as análises foram feitas para o nó 2, a 10 km da subestação.

De acordo com o gráfico da figura 8.2, conforme já se havia adiantado, os erros associados ao método 2 são pouco influenciados pelo valor da resistência de falta até 200Ω (novamente, isso é verdade para o alimentador analisado, não é um limite de resistência válido para qualquer alimentador). Os seus resultados são superiores aos do método da componente reativa da impedância, exceto em faltas cuja corrente torna a corrente das cargas desprezível (isso é verdade para faltas abaixo de 50Ω nesse alimentador).

Tabela 8.6 - Comparação de Resultados entre o Método 2 e o Método da Componente Reativa da Impedância no Primeiro Alimentador-Teste.

R_f (Ω)	Método 2 (km)	Erro (% C. T.)	Componente Reativa (km)	Erro (% C. T.)
1	10,138	0,92	9,988	-0,08
10	10,127	0,85	9,977	-0,15
50	10,080	0,53	10,076	0,51
75	10,050	0,33	10,256	1,70
100	10,021	0,14	10,521	3,47
150	9,962	-0,26	11,296	8,64
200	9,902	-0,65	12,375	15,83

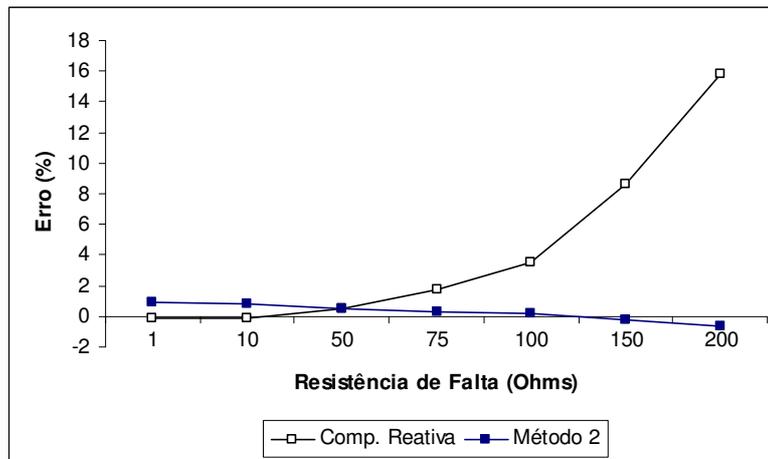


Figura 8.2 - Comparação de Resultados entre Método 2 e Método da Componente Reativa no Primeiro Alimentador-Teste.

8.2.3 INFLUÊNCIA DE VARIAÇÕES NAS CARGAS DURANTE AS FALTAS

Nas simulações descritas anteriormente para testar os métodos analíticos as cargas foram modeladas como impedâncias constantes. Essa opção é a mais conveniente ao se empregar o ATP, pois é a única disponível na biblioteca de componentes-padrões e não apresenta problemas de convergência numérica.

Porém, conforme colocado no Capítulo 2, determinadas cargas possuem impedâncias que variam com a tensão aplicada em seus terminais. Cargas com potência constante, por exemplo, diminuem sua impedância com a queda de tensão que ocorre durante uma falta a fim de manter o valor de potência especificado.

Dessa forma, é importante considerar que a corrente de carga suprida antes da falta que é assumida nos métodos apresentados, em uma situação real, poderia ser menor do que aquela que seria suprida durante a falta. Com o intuito de avaliar tal situação foram simuladas as seguintes variações de carga:

- Erro de -40% na corrente de carga assumida nas equações para localização das faltas de 25 e 50Ω;
- Erro de -20% na corrente de carga assumida para faltas de 75 e 100Ω.

Tabela 8.7 - Sensibilidade à Carga Assumida no Método 1.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f</i> <i>(Ω)</i>	<i>Distância</i> <i>(km)</i>	<i>Valor Anterior</i> <i>(km)</i>	<i>Novo Valor</i> <i>(km)</i>	<i>Alteração</i> <i>(%C. T.)</i>
Nó 2	25	10.000	10,057	10,046	-0,11
	50	10.000	10,113	10,120	0,07
	75	10.000	10,169	10,195	0,25
	100	10.000	10,224	10,286	0,60
Nó 3	25	15.000	15,048	15,027	-0,14
	50	15.000	15,095	15,083	-0,08
	75	15.000	15,141	15,153	0,08
	100	15.000	15,188	15,232	0,29

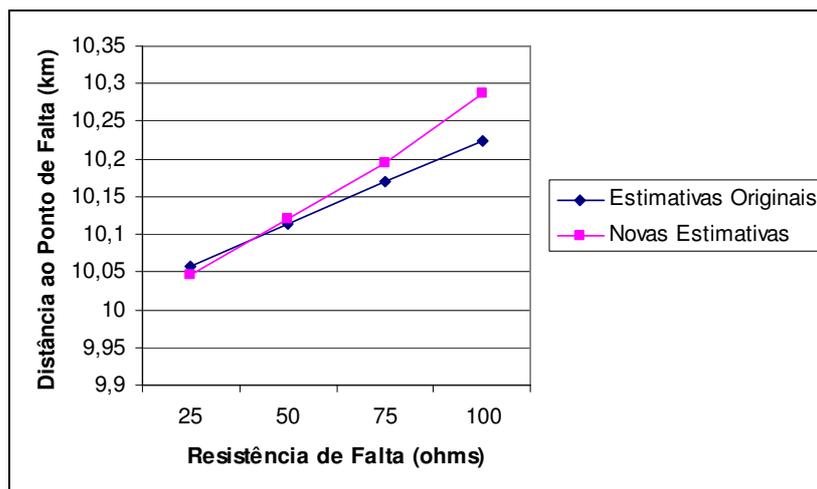


Figura 8.3 - Sensibilidade à Carga Assumida no Método 1.

Os dois valores arbitrados para as variações foram avaliados no alimentador

verificando-se a queda de tensão na carga mais distante, e são diferentes porque em faltas de impedâncias menores as quedas de tensão (e, por conseguinte, as variações das impedâncias) são maiores. Faltas de impedâncias menores que 25Ω têm seu processo de localização muito pouco influenciado pela carga assumida nesse alimentador, por isso não foram levadas em conta aqui.

Tabela 8.8: Sensibilidade à Carga Assumida no Método 2.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f</i> <i>(Ω)</i>	<i>Distância</i> <i>(km)</i>	<i>Valor Anterior</i> <i>(km)</i>	<i>Novo Valor</i> <i>(km)</i>	<i>Alteração</i> <i>(%C. T.)</i>
Nó 2	25	10,000	10,109	10,123	0,14
	50	10,000	10,080	10,137	0,56
	75	10,000	10,050	10,114	0,64
	100	10,000	10,021	10,134	1,13
Nó 3	25	15,000	15,138	15,152	0,09
	50	15,000	15,069	15,126	0,38
	75	15,000	15,001	15,065	0,43
	100	15,000	14,933	15,046	0,76

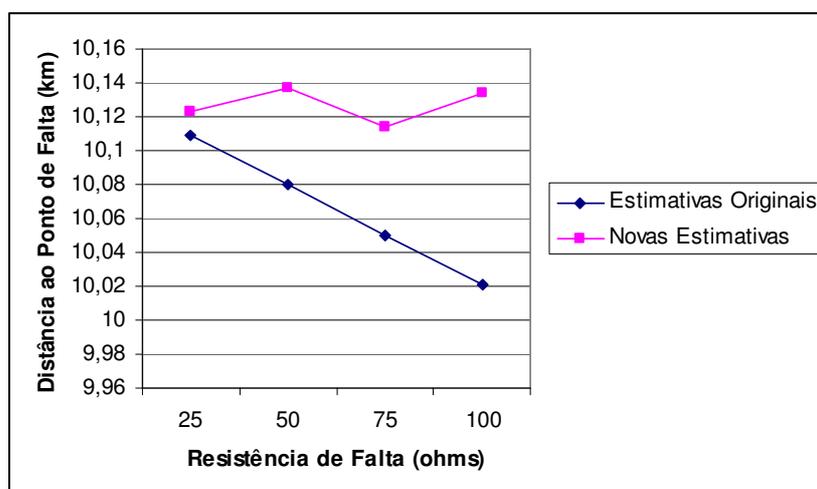


Figura 8.4 - Sensibilidade à Carga Assumida no Método 2.

Os resultados para os dois métodos, mostrados nas tabelas 8.7 e 8.8 indicam que o processo de localização de faltas apresenta uma pequena sensibilidade à variação na carga assumida nas equações, mas a precisão das estimativas continua sendo satisfatória com erros inferiores a 300 metros (ou 2% do comprimento do alimentador).

As tabelas apresentam as estimativas obtidas anteriormente e as novas estimativas, indicando as variações percentuais obtidas no cálculo da distância para faltas do tipo *a-t* simuladas em 10 e 15 km da subestação. Todas as variações verificadas foram inferiores a 1,13%.

Os gráficos das figuras 8.3 e 8.4, obtidos para o ponto de falta situado em 10 km, evidenciam que o método 2 é ligeiramente mais sensível do que o método 1 às variações na carga assumida nas equações.

A influência relativamente pequena da carga assumida para o cálculo da distância ao ponto de falta, nos dois métodos (em especial no método 1), se deve ao fato da impedância equivalente das cargas do alimentador estudado ser pelo menos 10 vezes maior que a impedância de falta no pior caso analisado.

8.3 RESULTADOS DA METODOLOGIA BASEADA EM REDES NEURAI

Anteriormente, verificou-se a ocorrência de estimativas para a distância ao ponto de falta com erros acima de 2% do comprimento do alimentador para faltas que excediam o limite de 200Ω , no método 1. O método 2 se mostrou mais robusto nesse sentido, mas ainda assim a precisão das estimativas passa a cair para resistências de falta acima de 300Ω . Na ferramenta computacional para localização de faltas o módulo neural é acionado quando a estimativa inicial para a resistência de falta exceder 300Ω , para o primeiro alimentador-teste.

Tendo isso em conta, as redes neurais para os diferentes trechos do primeiro alimentador-teste foram treinadas com valores de resistência de falta entre 300 e 1 k Ω .

8.3.1 ERROS DE TREINAMENTO E VALIDAÇÃO

Os resultados da localização de faltas de alta-impedância no primeiro alimentador-teste são mostrados no conjunto de tabelas a seguir. Todas as faltas incidem na fase *a* do alimentador principal. A tabela 8.9 traz os resultados do conjunto de treinamento. É possível identificar os valores de resistência e os locais de falta que foram escolhidos para definir o mapeamento entrada/saída do problema, de acordo com os conceitos do Capítulo 6.

Para avaliação da eficiência do treinamento, 3 diferentes conjuntos de validação foram empregados:

1. *Primeiro conjunto de validação*: os locais de falta são os mesmos do conjunto de treinamento, mas os valores de resistência são diferentes (resultados na Tabela 8.10);
2. *Segundo conjunto de validação*: os valores de resistência de falta constam no conjunto de treinamento, mas os locais são diferentes (resultados na Tabela 8.11);
3. *Terceiro conjunto de validação*: tanto a resistência quanto os locais das faltas não constam no conjunto de treinamento (resultados na Tabela 8.12).

A figura 8.5 mostra a média do módulo dos erros obtida no conjunto de treinamento e nos 3 conjuntos de validação no cálculo da distância ao ponto de falta. Embora os erros do conjunto de treinamento sejam menores, os erros dos três conjuntos de validação

também são relativamente pequenos e se encontram em uma ordem de grandeza semelhante aos erros de treinamento.

Nos estudos para localização de faltas de alta-impedância estão sendo considerados *satisfatórios* os erros inferiores a 3% do comprimento do alimentador.

Tabela 8.9 - Resultados para Casos do Conjunto de Treinamento.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f (Ω)</i>	<i>Distância (km)</i>	<i>Valor Obtido (km)</i>	<i>Erro (% C. T.)</i>
Saída Subestação	300	0,000	0,082	0,55
	400	0,000	-0,105	-0,70
	500	0,000	-0,022	-0,15
	600	0,000	0,143	0,95
	800	0,000	-0,075	-0,50
	1000	0,000	0,000	0,00
Ponto médio seção 2-3	300	7,500	7,440	-0,40
	400	7,500	7,493	-0,05
	500	7,500	7,470	-0,20
	600	7,500	7,597	0,65
	800	7,500	7,565	0,10
	1000	7,500	7,410	-0,60
Nó 3	300	15,000	14,988	-0,15
	400	15,000	15,157	1,05
	500	15,000	15,007	0,05
	600	15,000	15,007	0,05
	800	15,000	14,940	-0,40
	1000	15,000	14,978	-0,15

Na figura 8.6 é mostrada a evolução do treinamento da rede neural que corresponde aos resultados das tabelas, indicando a ausência de oscilações e uma convergência em 148 épocas para o erro médio quadrático admitido sobre todo o conjunto de treinamento igual a

10^{-6} . Esse treinamento foi o melhor em uma seqüência de dez simulações após a definição dos dados de treinamento, validação, e dos parâmetros da rede.

Tabela 8.10 - Resultados para Casos do Primeiro Conjunto de Validação.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f</i> (Ω)	<i>Distância</i> (km)	<i>Valor Obtido</i> (km)	<i>Erro</i> (% C. T.)
Saída Subestação	350	0,000	0,007	0,05
	450	0,000	-0,105	-0,70
	700	0,000	0,097	0,65
	900	0,000	-0,165	-1,10
Entre 1-2	350	7,500	7,567	0,45
	450	7,500	7,440	-0,40
	700	7,500	7,627	0,85
	900	7,500	7,433	-0,45
Nó 3	350	15,000	15,195	1,30
	450	15,000	15,067	0,45
	700	15,000	15,022	0,15
	800	15,000	14,472	-0,85

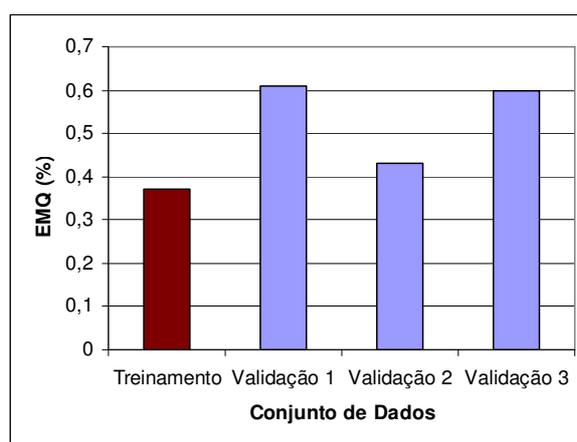


Figura 8.5 – Média dos Erros para os Diferentes Conjuntos de Dados.

Tabela 8.11 - Resultados para Casos do Segundo Conjunto de Validação.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f (Ω)</i>	<i>Distância (km)</i>	<i>Valor Obtido (km)</i>	<i>Erro (% C. T.)</i>
Entre nós s-1	300	3,750	3,750	0,00
	400	3,750	3,630	-0,80
	500	3,750	3,645	-0,70
	600	3,750	3,810	0,40
	800	3,750	3,668	-0,55
	1000	3,750	3,750	0,00
Entre nós 2-3	300	11,250	11,153	-0,65
	400	11,250	11,340	0,60
	500	11,250	11,257	0,05
	600	11,250	11,340	0,60
	800	11,250	11,287	0,25
	1000	11,250	11,340	0,60

Tabela 8.12 - Resultados para Casos do Terceiro Conjunto de Validação.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f (Ω)</i>	<i>Distância (km)</i>	<i>Valor Obtido (km)</i>	<i>Erro (%C. T.)</i>
Entre nós s-1	350	3,750	3,750	0,00
	450	3,750	3,593	-1,05
	700	3,750	3,693	0,45
	900	3,750	3,588	-1,15
Entre nós 2-3	350	11,250	11,377	0,85
	450	11,250	11,277	0,15
	700	11,250	11,377	0,85
	900	11,250	11,205	-0,30

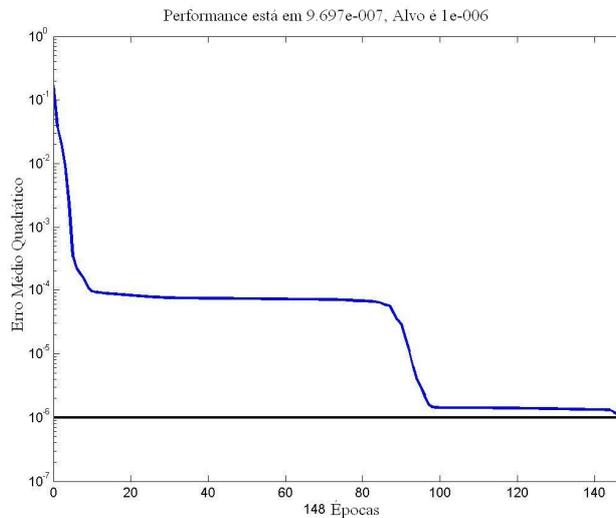


Figura 8.6 - Evolução do Treinamento da Rede Neural para a Fase *a* do Alimentador Principal.

8.3.2 FALTAS EM DERIVAÇÕES LATERAIS

Além de faltas no alimentador principal foram analisadas faltas nas derivações laterais. Inicialmente, foi adotada a estratégia de redução do número de redes neurais necessárias, que utiliza aquela treinada para o alimentador principal para apontar a distância a faltas nas derivações.

Os resultados estão na tabela 8.13, onde a parte destacada se refere à derivação lateral DL2, para a qual erros apreciáveis foram obtidos. Nesse caso, uma rede neural específica para esse trecho foi treinada, e alguns resultados constantes na parte inferior da tabela apresentam, como esperado, uma precisão bem mais elevada. Todas as faltas na Tabela 8.13 possuem resistência de falta igual a 500Ω.

O motivo para que a rede neural treinada para o alimentador principal não forneça bons resultados para faltas em DL2 é, possivelmente, o tipo de condutor empregado nos dois trechos, cujos valores de impedância por unidade de comprimento são muito distintos (ver Anexo B, dados do primeiro alimentador-teste).

Ao contrário, os trechos DL1 e DL3, que possuem o mesmo tipo de condutor do alimentador principal, foram objetos de bons resultados. Esse fato não pode ser considerado uma verdade a qualquer alimentador, já que a disposição das cargas também pode influenciar, mas é uma evidência que pode ser levada em conta no projeto das redes neurais para localização de faltas através da arquitetura modular proposta.

Tabela 8.13 - Localização de Faltas de 500 Ω nas Derivações Laterais do Primeiro Alimentador-Teste.

	<i>Local Falta</i>	<i>Distância (km)</i>	<i>Valor Obtido (km)</i>	<i>Erro (%C. T.)</i>
DL1	Nó 8	10,000	9,895	-0,70
	Nó 9	15,000	14,678	-2,15
DL2	Nó 10	12,500	13,212	4,75
	Nó 11	15,000	16,395	9,30
DL3	Nó 5	10,000	9,828	-1,15
	Nó 7	15,000	14,708	-1,95
<i>Rede Neural Específica para DL2</i>				
DL2	Entre 2-10	11,250	11,151	-0,67
	Nó 10	12,500	12,597	0,65
	Entre 10-11	13,750	13,712	-0,25
	Nó 11	15,000	15,047	0,31

Ao se aplicar a equação 6.1 para o primeiro alimentador-teste, estima-se que são necessárias 189 amostras de treinamento para a localização de faltas em todos os trechos levando em conta 3 níveis de carregamento (leve, médio e pesado). Considerou-se que não é necessário o treinamento de novas redes para as derivações DL1 e DL3. Esse número é bastante reduzido se comparado, por exemplo, ao trabalho de MOHAMED et al. (1996), onde o número total de amostras apresentado para *um único trecho* é 531, considerando

somente as faltas de alta-impedância. Ressalvas devem ser feitas ao fato dos autores não apresentarem a faixa de impedâncias analisadas, mas é um bom indicativo de que o número empregado aqui é reduzido.

8.4 RESULTADOS NO SEGUNDO ALIMENTADOR-TESTE

O segundo alimentador-teste corresponde ao modelo de um alimentador do Arizona (EUA) que tem sido sugerido pelo comitê responsável do IEEE para que pesquisadores o tomem como uma das referências nos seus estudos em sistemas de distribuição. A carga total instalada é de 2054 kVA. A topologia do alimentador com os identificadores de cada nó definidos pelo IEEE é mostrada na figura 8.7.

Ele foi escolhido para os testes adicionais dos métodos por uma característica principal: o seu comprimento, que no ponto mais distante do tronco principal chega a 57,631 km (da subestação ao nó 840). Essa é uma condição crítica para se testar métodos de localização de faltas a partir de medidas na subestação.

Dados desse alimentador constam no *Anexo C*. Detalhes adicionais podem ser obtidos em (KERSTING, 2001), ou no endereço eletrônico <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html> (último acesso: dezembro/2005). Durante a seqüência deste texto o alimentador IEEE - 34 nós será referido como o *segundo alimentador-teste*.

8.4.1 MÉTODO 1

Os resultados no método 1 no segundo alimentador-teste são mostrados na tabela 8.14, supondo a ocorrência de faltas envolvendo a fase *b* e a terra. Na tabela 8.15 são mostrados resultados da localização de faltas trifásicas equilibradas para a terra.

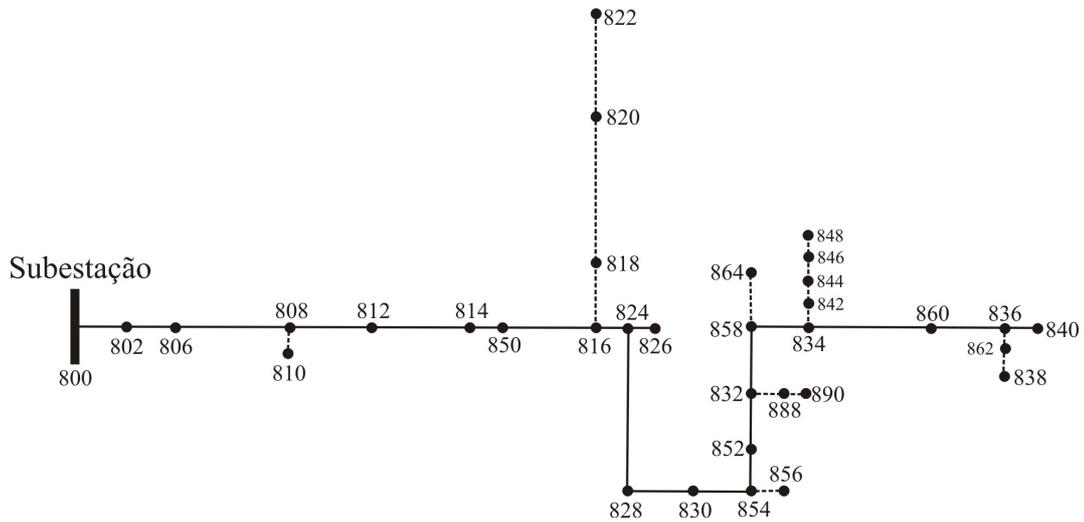


Figura 8.7 - Topologia do Segundo Alimentador-Teste.

Tabela 8.14 – Segundo Alimentador-Teste com Falhas *b-t* via Método 1.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f</i> (Ω)	<i>Distância</i> (km)	<i>Valor Obtido</i> (km)	<i>Erro</i> (% C.T.)
Nó 808	5	11,137	11,165	0,05
	25	11,137	11,349	0,37
	50	11,137	11,572	0,75
Nó 814	5	31,629	31,506	-0,21
	25	31,629	31,979	0,61
	50	31,629	32,548	1,59
Nó 832	5	52,406	52,028	-0,65
	25	52,406	52,433	0,05
	50	52,406	52,931	0,91

Todos os resultados obtidos possuem erro associados menores do que 1,59% do comprimento total do alimentador. Devido à extensão da rede elétrica em questão, esse erro em unidades de comprimento é de 919 metros. Os erros apresentam uma tendência moderada de aumento em função da distância ao ponto de falta.

Tabela 8.15 - Segundo Alimentador-Teste com Falhas *a-b-c-t* via Método 1.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f</i> (Ω)	<i>Distância</i> (km)	<i>Valor Obtido (km)</i>	<i>Erro</i> (% C.T.)
Nó 808	5	11,137	11,139	0,00
	25	11,137	11,207	0,12
	50	11,137	11,290	0,26
Nó 814	5	31,629	31,509	-0,20
	25	31,629	31,682	0,09
	50	31,629	31,895	0,46
Nó 832	5	52,406	52,089	-0,54
	25	52,406	52,172	-0,40
	50	52,406	52,275	-0,22

8.4.2 MÉTODO 2

Novamente, os mesmos testes realizados para o método 1, foram feitos para o método 2. Os resultados são mostrados na tabela 8.16 (faltas *b-t*) e na tabela 8.17 (faltas trifásicas equilibradas).

O maior erro obtido foi de 2,76% do comprimento total do alimentador, em um ponto situado a 52,406 km da subestação, portanto bastante distante do ponto de medição dos fasores de tensão e corrente. Isso é mais um indicativo, já verificado para o primeiro alimentador-teste, de que os erros associados ao método 2 apresentam uma tendência de aumento em função da distância ao ponto de falta. Nesse alimentador, diferentemente dos estudos anteriormente realizados para esse método, os erros também mostram uma influência do aumento da resistência de falta, aumentando em função desse parâmetro, na maioria dos casos.

Tabela 8.16 - Segundo Alimentador-Teste com Falhas *b-t* via Método 2.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f (Ω)</i>	<i>Distância (km)</i>	<i>Valor Obtido (km)</i>	<i>Erro (% C.T.)</i>
Nó 808	5	11,137	11,103	-0,06
	25	11,137	11,075	-0,11
	50	11,137	11,110	-0,05
Nó 814	5	31,629	31,308	-0,55
	25	31,629	31,054	-1,00
	50	31,629	30,822	-1,40
Nó 832	5	52,406	51,731	-1,17
	25	52,406	51,223	-2,05
	50	52,406	50,814	-2,76

Tabela 8.17 - Segundo Alimentador-Teste com Falhas *a-b-c-t* via Método 2.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f (Ω)</i>	<i>Distância (km)</i>	<i>Valor Obtido (km)</i>	<i>Erro (% C.T.)</i>
Nó 808	5	11,137	11,125	-0,02
	25	11,137	11,130	-0,01
	50	11,137	11,171	0,059
Nó 814	5	31,629	31,487	-0,24
	25	31,629	31,430	-0,34
	50	31,629	31,400	-0,40
Nó 832	5	52,406	51,908	-0,86
	25	52,406	51,720	-1,18
	50	52,406	51,588	-1,42

8.4.3 NOVAS COMPARAÇÕES COM O MÉTODO DA COMPONENTE REATIVA

As comparações dos métodos 1 e 2 com o método da componente reativa da impedância para um único ponto, mas diversos valores de resistência, no segundo alimentador, mostram uma vantagem na utilização dos mesmos. O conjunto de respostas

obtidas para os três métodos é mostrado na tabela 8.18, e os erros obtidos para cada método na figura 8.8. Todas as faltas envolvem a fase *b* e a terra. O ponto de falta está situado a 11,137 km da subestação. O método 2 obteve as melhores respostas, mas o método 1 ainda se mostrou, de longe, mais preciso que o método da componente reativa.

Tabela 8.18 - Comparações com o Método da Componente Reativa no Segundo Alimentador-Teste.

R_f (Ω)	Método 1 (km)	Erro (%)	Método 2 (km)	Erro (%)	Componente Reativa (km)	Erro (%)
0,1	11,119	-0,03	11,118	-0,03	10,918	-0,37
1	11,128	-0,02	11,115	-0,04	10,911	-0,39
5	11,165	0,05	11,103	-0,06	10,906	-0,40
10	11,212	0,13	11,091	-0,08	10,963	-0,30
25	11,349	0,37	11,075	-0,11	11,509	0,64
50	11,572	0,75	11,110	-0,05	13,410	3,94

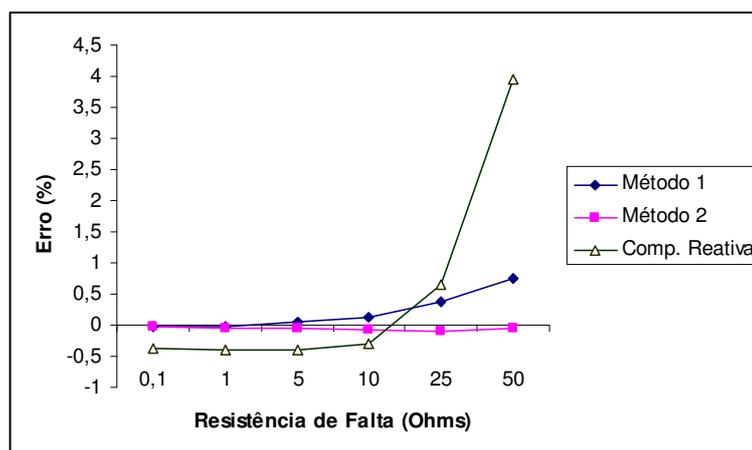


Figura 8.8 - Erros dos Diferentes Métodos no Segundo Alimentador-Teste.

8.4.4 MÉTODO BASEADO EM REDES NEURAIIS

Para o método de localização de faltas de alta-impedância no segundo alimentador-

teste, as seguintes alterações nas estratégias de treinamento foram necessárias, com referência aos estudos mostrados no primeiro alimentador-teste, para a rede neural do alimentador principal, devido ao seu comprimento incomum:

- Inclusão de faltas em dois pontos intermediários no conjunto de treinamento: entre o início e a metade, e entre a metade e o final do alimentador;
- Os valores alvo foram modificados para 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 e 0,9. Esses valores conduziram a erros menores, em unidades de comprimento, daqueles verificados para os valores testados inicialmente (0,1, 0,2 e 0,3, que haviam se mostrado mais efetivos no primeiro alimentador);
- Os valores de resistência no conjunto de treinamento variam entre 100 e 500 Ω , incluindo os múltiplos de 100 e acrescentando o valor 150 Ω . Para faltas acima de 500 Ω , o processo de localização fica limitado pelo fato da corrente de falta ser praticamente da mesma magnitude da corrente das cargas, então as variações na magnitude da corrente em função da posição e da resistência de falta passam a ser pouco significativas, tornando o processo de localização inviável apenas com a componente fundamental. O limite de impedância decresce para o segundo alimentador-teste devido ao seu carregamento bem mais elevado que o primeiro.

Os resultados da tabela 8.19 indicam a obtenção de respostas exatas para o conjunto de treinamento (tipo de dado T), e erros inferiores a 1,5% do comprimento do alimentador para os dados de validação (tipo de dado V), para faltas na fase a do alimentador principal.

A localização de faltas em derivações do segundo alimentador-teste é bastante favorável ao procedimento para redução do número de amostras de treinamento: o

comprimento do alimentador principal é significativamente maior o de todas as derivações laterais, o que pode ser percebido no diagrama da figura 8.7.

Tabela 8.19 - Falta *a-t* de Alta-Impedância no Segundo Alimentador-Teste.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f</i> (Ω)	<i>Distância</i> (<i>km</i>)	<i>Valor Obtido</i> (<i>km</i>)	<i>Erro</i> (% C.T.)	<i>Tipo Dado</i>
Seção 812 – 814	100	28,835	28,856	0,04	T
	300	28,835	29,043	0,36	T
	500	28,835	28,900	0,11	T
Nó 854	250	41,480	41,903	0,73	V
	350	41,480	42,291	1,40	V
	450	41,480	41,262	-0,38	V
Nó 832	250	52,406	52,897	0,85	V
	350	52,406	52,840	0,75	V
	450	52,406	52,609	0,35	V
Nó 840	250	57,671	57,627	0,08	V
	350	57,671	57,822	0,26	V
	450	57,671	57,635	-0,06	V

T – Dado de treinamento. V – Dado de validação.

Testes realizados em diferentes pontos de derivações laterais conduzem a bons resultados. Porém, na derivação lateral originada no nó 816 alguns resultados pouco satisfatórios foram obtidos (parte destacada da tabela). Essa expansão do alimentador que só inclui a fase *a* (derivação monofásica) é longa (em torno de 19 km) e possui um condutor com resistência por unidade de comprimento 70% maior que a do alimentador principal.

De modo semelhante ao que foi feito para o primeiro alimentador-teste, treina-se uma rede neural independente para esse trecho, obtendo-se novos e melhores resultados

(mas tornando necessário o levantamento de novas amostras de treinamento via simulações no ATP).

Tabela 8.20 - Localização de Faltas em Derivações Laterais no Segundo Alimentador-Teste.

<i>Local Falta</i>	<i>R_f</i> <i>(Ω)</i>	<i>Distância</i> <i>(km)</i>	<i>Valor Obtido</i> <i>(km)</i>	<i>Erro</i> <i>(%C. T.)</i>
Nó 848	200	57,582	57,483	-0,17
	250	57,582	57,145	-0,75
	300	57,582	57,404	-0,30
	350	57,582	57,606	0,04
Nó 822	200	51,109	55,719	7,99
	250	51,109	55,640	7,85
	300	51,109	56,238	8,89
	350	51,109	57,087	10,36
<i>Rede Neural Específica para o Trecho 816-822</i>				
Nó 822	200	51,109	51,158	0,08
	250	51,109	51,221	0,19
	300	51,109	51,046	-0,10
	350	51,109	51,198	0,15

Os outros casos da tabela 8.20 foram em um dos locais onde a obtenção da distância ao ponto de falta foi satisfatória nas derivações laterais com a rede neural do alimentador principal. O nó 848 se localiza na segunda derivação lateral mais longa da fase *a*, com comprimento de aproximadamente 1,75 km (que é, contudo em torno de 30 vezes menor que o comprimento do alimentador principal).

O número total de casos necessários para a localização de faltas no segundo alimentador-teste considerando 3 perfis de carregamento é igual a 324. Desses, 270 são para o alimentador principal e o restante para a derivação lateral monofásica originada no

nó 816.

8.5 ESTUDOS DE SENSIBILIDADE

É importante avaliar os resultados dos três métodos propostos considerando fontes de erros presentes no processo de localização de faltas em casos reais. Para isso foi feita uma série de estudos de sensibilidade. Todos os estudos foram feitos no segundo alimentador-teste.

8.5.1 MÉTODOS ANALÍTICOS

Já se havia investigado a influência de variações na carga assumida nas equações dos métodos analíticos anteriormente. Nesta subseção, constam os resultados de uma série de simulações com os métodos 1 e 2, para a avaliação dos mesmos quando se assumem outros erros comuns nos parâmetros adotados nas equações, a saber:

1. Variações na magnitude e ângulo das tensões e correntes nas fases em falta, dentro dos limites de tolerância de transformadores de instrumentos com classe de precisão 0,6 (STD-IEEE, 1993). Nesse caso, os erros de magnitude e fase seguem os valores máximos e mínimos indicados nos casos a serem analisados na sequência;
2. Variações de $\pm 3\%$ nas impedâncias equivalentes das seções do alimentador estudado, procedimento sugerido em DAS (1998).

Apenas os parâmetros relacionados com as fases em falta foram modificados, assim, para as faltas estudadas na fase *b*, não foram incluídos erros na impedância da fase *a*, por exemplo. Todas as faltas foram simuladas no segundo alimentador-teste, no nó 808,

situado a 11,137 km da subestação e possuem resistência de falta igual a 25Ω .

Para analisar as implicações das variações nas magnitudes dos fasores de tensão e corrente em função dos erros simulados dos transformadores de instrumentos com classe de precisão 0,6, os seguintes casos foram analisados:

<i>ID</i>	$ V_b $	$ I_b $
1	0	+0,6%
2	0	-0,6%
3	+0,6%	0
4	-0,6%	0%
5	+0,6%	-0,6%
6	-0,6%	+0,6%

O código ID serve para especificar as variações nos parâmetros que são simuladas em cada caso. Os resultados são mostrados na tabela 8.21:

Tabela 8.21: Resultados de Variações nas Magnitudes da Tensão e da Corrente para o Método 1.

<i>ID</i>	<i>Erro Anterior</i> (% C. T.)	<i>Novo Erro</i> (% C. T.)
1	0,37	0,25
2	0,37	0,48
3	0,37	0,48
4	0,37	0,24
5	0,37	0,60
6	0,37	0,13

Por outro lado, para analisar as implicações das variações nos ângulos fasores de tensão e corrente, os seguintes casos foram analisados:

<i>ID</i>	<i>Ângulo V_b</i>	<i>Ângulo I_b</i>
1	0	+30'
2	0	-30'
3	+30'	0
4	-30'	0
5	+30'	-30'
6	-30'	+30'

Os resultados são mostrados na tabela 8.22:

Tabela 8.22: Resultados de Variações nos Ângulos da Tensão e da Corrente para o Método 1.

<i>ID</i>	<i>Erro Anterior (% C. T.)</i>	<i>Novo Erro (% C. T.)</i>
7	0,37	-0,29
8	0,37	1,02
9	0,37	0,97
10	0,37	-0,24
11	0,37	1,63
12	0,37	-0,90

Para analisar as implicações das variações nas impedâncias por unidade de comprimento da fase em falta, dois casos limites foram analisados:

<i>ID</i>	<i>Impedâncias em Ω/km do trecho analisado</i>
13	+3%
14	-3%

Os resultados estão na tabela 8.23.

Tabela 8.23 - Resultados de Variações nas Impedâncias por Unidade de Comprimento para o Método 1.

<i>ID</i>	<i>Erro Anterior (% C. T.)</i>	<i>Novo Erro (% C. T.)</i>
13	0,37	0,30
14	0,37	0,43

Para o método 1, analisando os resultados acima, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- Algumas estimativas se tornam mais precisas ao se simular os erros nos parâmetros. Essa condição é aleatória e ocorre devido à correlação complexa entre as variáveis, onde erros de leitura ou nos parâmetros assumidos podem, em determinados casos, “ajudar” as equações para apontar a distância ao ponto de falta (tendência que *não* se verifica na maioria dos casos);
- Com relação à magnitude dos fasores, a sensibilidade é rigorosamente a mesma para a tensão e a corrente. Variações combinadas nas magnitudes levam a maiores erros. Isso é lógico, dado que o método possui uma formulação baseada

em quocientes dessas quantidades;

- A influência dos erros nos ângulos das tensões e correntes, dentro da classe de precisão analisada, é maior que a verificada para a magnitude, levando aos maiores erros de todo o conjunto de simulações analisados aqui;
- A influência da variação das impedâncias por unidade de comprimento, no intervalo de $\pm 3\%$ modifica moderadamente as estimativas;
- O maior erro obtido não ultrapassa 1,63% do comprimento total do alimentador.

Os mesmos erros dos casos descritos anteriormente foram simulados no método 2, e os resultados são mostrados nas tabelas 8.24 – 8.26.

Tabela 8.24: Resultados de Variações nas Magnitudes da Tensão e da Corrente para o Método 2.

<i>ID</i>	<i>Erro Anterior</i> (% C. T.)	<i>Novo Erro</i> (% C. T.)
1	-0,11	-0,21
2	-0,11	0,01
3	-0,11	0
4	-0,11	-0,21
5	-0,11	0,11
6	-0,11	-0,32

Para o método 2, podem-se tirar as mesmas conclusões verificadas para o método 1. A sensibilidade dos dois métodos aos parâmetros analisados é muito parecida.

Tabela 8.25: Resultados de Variações nos Ângulos da Tensão e da Corrente para o Método 2.

<i>ID</i>	<i>Erro Anterior</i> (% C. T.)	<i>Novo Erro</i> (% C. T.)
7	-0,11	-0,75
8	-0,11	0,54
9	-0,11	0,53
10	-0,11	-0,74
11	-0,11	1,18
12	-0,11	-1,40

Tabela 8.26: Resultados de Variações nas Impedâncias por Unidade de Comprimento para o Método 2.

<i>ID</i>	<i>Erro Anterior</i> (% C. T.)	<i>Novo Erro</i> (% C. T.)
13	-0,11	-0,16
14	-0,11	-0,05

8.5.2 MÉTODO BASEADO EM REDES NEURAIS

Os seguintes estudos de sensibilidade foram feitos para a metodologia baseada em redes neurais.

1. Variações na magnitude e ângulo da corrente na fase em falta, dentro dos limites de tolerância de transformadores de instrumentos com classe de precisão 0,6;
2. Variações de $\pm 3\%$ nas impedâncias equivalentes das seções do trecho para o

qual a rede neural foi treinada;

3. Variações de $\pm 15\%$ nos valores assumidos nos pontos de carga do modelo do alimentador.

Note que para avaliação da sensibilidade a impedâncias e cargas, é preciso alterar o modelo do alimentador para o qual os casos de treinamento foram obtidos, a fim de simular situações onde esse modelo difere do estado real do alimentador.

Todas as análises foram feitas para o nó 808 do alimentador principal, portanto a 11,137 km da subestação com faltas na fase *a*. A resistência de falta em todos os casos é de 150 Ω .

As variações de magnitude e ângulo das correntes foram avaliadas em 6 diferentes casos:

<i>ID</i>	$ I_a $	<i>Ângulo I_a</i>
15	+0,6%	0
16	-0,6%	0
17	0	+30'
18	0	-30'
19	+0,6%	-30'
20	-0,6%	-30'

Os resultados estão na tabela 8.27.

Para analisar as implicações das variações nas impedâncias por unidade de comprimento da fase em falta do modelo adotado para o alimentador, os mesmos casos analisados anteriormente foram simulados, a saber:

<i>ID</i>	<i>Impedâncias em Ω/km do trecho analisado</i>
21	+3%
22	-3%

Tabela 8.27 - Resultados de Variações na Magnitude e Ângulo da Corrente para o Método Baseado em Redes Neurais.

<i>ID</i>	<i>Erro Anterior (% C. T.)</i>	<i>Novo Erro (% C. T.)</i>
15	-0,25	-0,11
16	-0,25	-0,57
17	-0,25	-2,78
18	-0,25	2,09
19	-0,25	2,28
20	-0,25	1,89

Os resultados das variações nas impedâncias estão na tabela 8.28.

Tabela 8.28 - Resultados de Variações nas Impedâncias por Unidade de Comprimento no Método Baseado em Redes Neurais.

<i>ID</i>	<i>Erro Anterior (% C. T.)</i>	<i>Novo Erro (% C. T.)</i>
21	-0,25	0,01
22	-0,25	-1,04

Finalmente, para a análise do impacto das variações nos valores assumidos da carga

suprida para nos diversos nós do alimentador, foram simuladas as variações mostradas abaixo. Os resultados estão na tabela 8.29.

<i>ID</i>	<i>Variação dos Pontos de Carga</i>
23	+15%
24	-15%

Tabela 8.29 - Resultados de Variações nas Cargas para o Método Baseado em Redes Neurais.

<i>ID</i>	<i>Erro Anterior (% C. T.)</i>	<i>Novo Erro (% C. T.)</i>
23	-0,25	1,15
24	-0,25	-2,73

Para o método baseado em redes neurais, podem-se tirar as seguintes conclusões principais:

- Diferenças na magnitude da corrente, dentro da classe de precisão estudada, influenciam moderadamente os resultados;
- Diferenças na fase da corrente provocam erros significativos nos resultados. Isso torna aconselhável, dependendo dos recursos disponíveis, a utilização de transformadores de corrente com classe de precisão 0,3, onde as variações de fase se encontram em uma faixa 50% menor do que a classe de precisão que foi considerada. A análise foi feita com a classe 0,6, justamente, para ser mais conservadora;
- Variações nas cargas são tão significativas quando variações na fase das correntes, provocando erros de 2,73% do comprimento do alimentador. Então,

deve-se analisar o modelo do alimentador e treinar redes neurais independentes para os principais perfis de carregamento, a fim de se obter respostas satisfatórias;

- Apesar das variações simuladas nos parâmetros, todas as estimativas apresentam erros inferiores a 3% do comprimento do alimentador. Isso é um resultado satisfatório, dado que não existem procedimentos analíticos adequados para a localização de faltas de alta-impedância.

8.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diversos testes para avaliar o estágio de cálculo da distância ao ponto de falta, através dos métodos propostos neste trabalho, foram apresentados neste capítulo.

A análise dos resultados dos métodos analíticos mostra que tanto o método direto quanto o método iterativo apresenta resultados melhores que os obtidos a partir do método da componente reativa da impedância, exceto em casos isolados onde a resistência de falta torna a impedância das cargas desprezível (o que raramente é verdade no contexto da distribuição).

A determinação da faixa de impedância de falta para a qual os algoritmos analíticos são aplicáveis deve ser avaliada em cada alimentador, através da construção de um modelo confiável do mesmo.

A partir de um determinado limiar para cada alimentador, foi testada a metodologia baseada em redes neurais.

Os resultados, nos dois alimentadores-teste, mostram a capacidade de mapeamento da função entrada/saída que caracteriza as redes multicamadas com o algoritmo de

retropropagação empregadas. Utilizando um conjunto reduzido de dados, em comparação ao número de possibilidades que o problema possui, obtém-se uma generalização apreciável para diversos dados de validação que foram analisados e, certamente, para outras faltas possíveis nos alimentadores estudados.

A análise de sensibilidade mostrou que, embora erros nos parâmetros adotados possam levar a modificações nas estimativas, os resultados ainda são satisfatórios tornando os métodos promissores.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

9.1 CONCLUSÕES

O trabalho de pesquisa descrito nos capítulos precedentes apresentou três metodologias inovadoras para localização de faltas em alimentadores de distribuição. As propostas e os resultados das implementações estiveram de acordo com os objetivos e contribuições citadas ainda no primeiro capítulo.

Os esforços empreendidos ao longo dos desenvolvimentos resultaram em um trabalho multidisciplinar com estudos e implementações computacionais nas áreas de modelagem e análise de alimentadores, processamento de sinais, redes neurais, e localização de faltas, logicamente, que no contexto da distribuição possui particularidades que tornam esse problema distinto daquele estudado em sistemas de transmissão.

Os métodos baseados nas componentes fundamentais de tensões e correntes medidas na subestação tiveram diversas limitações apuradas no Capítulo 3. A mais relevante delas, com relação à dependência da precisão dos mesmos com a resistência de falta, motivou a divisão das pesquisas em duas partes: métodos analíticos para localizar faltas de baixa-impedância e um método baseado em redes neurais para localizar faltas de alta-impedância. A faixa de aplicação de cada um deles é dependente do sistema estudado.

A seguir, algumas conclusões que complementam a análise dos resultados já feita no Capítulo 8 pertinentes a cada um desses métodos serão colocadas.

9.1.1 MÉTODOS ANALÍTICOS

Dois métodos analíticos foram propostos e identificados ao longo do texto por *método 1* e *método 2*. Qualquer um deles pode ser empregado com bons resultados para a localização de faltas de baixa-impedância. O objetivo da proposição de dois métodos foi prover a pesquisadores e empresas mais de uma alternativa que pode ser testada em um determinado alimentador.

O método 1 é uma formulação direta (não-iterativa) que permite levar em conta a não-transposição do alimentador na impedância série por unidade de comprimento, o que elimina uma das fontes de erro do processo. Através da solução de uma única equação, em um único passo, é possível se obter a localização da falta com uma boa precisão, mesmo em alimentadores longos. A simplicidade aliada a bons resultados é a característica mais relevante do método. Faltas de todos os tipos, com relação às fases envolvidas, podem ser localizadas sem necessidade de mudança na referência de fases. A equação apropriada é determinada com base na identificação prévia do tipo de falta.

Os resultados da aplicação do método 1 são superiores aos da componente reativa da impedância, que é comumente empregado como algoritmo de tomada de decisão e localização de faltas em relés digitais e localizadores de falta. Devido aos seus baixos-requisitos de memória e tempo de processamento, ele poderia ser empregado em qualquer uma dessas situações, aumentando a confiabilidade e a precisão dos resultados de tais equipamentos.

O método 2, por sua vez, resultou de pesquisas voltadas a modificar e melhorar alguns pontos na abordagem baseada no cálculo iterativo da distância ao ponto de falta a partir da característica resistiva de sua impedância. Essas modificações tiveram como principal objetivo tornar o processo mais eficiente e simples, mostrando a possibilidade de

obtenção de bons resultados frente a algumas simplificações convenientes. Resultados bastante satisfatórios foram obtidos, sem necessidade da estimação prévia da seção em falta do alimentador e representando as cargas em um único ponto com base nos valores de potência supridos antes da falta.

Como todo o processo foi implementado em ambiente de simulação, julgou-se necessário a realização de estudos de sensibilidade frente a erros nos parâmetros adotados nas equações. Essa análise aponta para a possibilidade de obtenção de boas respostas em casos reais, o que será abordado em seção posterior sobre trabalhos futuros.

9.1.2 MÉTODO BASEADO EM REDES NEURAIS

Tendo devidamente em conta característica ramificada dos alimentadores, uma arquitetura modular de redes neurais independentes diferente das encontradas na literatura foi proposta para a localização de faltas de alta-impedância. As redes neurais são determinadas com base não somente na tarefa a ser desempenhada, mas da região e do tipo de falta a ser localizada.

Os resultados mostram uma capacidade de aprendizado notável das redes neurais, pois a partir de um conjunto relativamente pequeno de amostras de casos de falta, respostas a casos totalmente distintos são obtidas com elevada precisão. Qualquer pessoa que tentar estabelecer mentalmente uma relação entre uma falta qualquer, com localização e resistência desconhecida, e os dados do conjunto de treinamento, certamente não conseguiria apontar a distância ao ponto da nova falta. As redes neurais de múltiplas camadas, com o algoritmo de retropropagação de erro, entretanto, respondem imediatamente a essa pergunta após terem sido devidamente treinadas.

Algumas limitações no emprego das redes neurais ao problema não se devem a

elas, mas às características dos sistemas de distribuição, por exemplo:

- Mudanças na topologia do alimentador podem tornar necessário o treinamento de novas redes neurais, para as principais configurações nas quais o alimentador opera;
- A conexão de um novo ponto de carga com potência elevada pode modificar as características do problema, sendo necessário re-treinar as redes. Isso indica que ferramentas baseadas em redes neurais devem estar em avaliação e atualização permanente, em casos onde o sistema estudado pode mudar ao longo do tempo.

Em suma, as redes neurais fornecem boas soluções quando os dados empregados no treinamento estão de acordo com as condições reais que o sistema localizador de faltas encontra. Discrepâncias nesse sentido levam a maus resultados. Cabe lembrar que a análise de sensibilidade descrita no Capítulo 8 mostra respostas satisfatórias mesmo quando determinados erros estão presentes no modelo utilizado para compor as amostras de treinamento.

Aparte dessas limitações, a ausência de procedimentos analíticos justifica pesquisas voltadas à aplicação de redes neurais ao problema de localização de faltas de alta-impedância em alimentadores, também por constituir uma alternativa de custo reduzido, já que para uma faixa considerável de valores de impedância a localização pode ser feita com base nas componentes fundamentais de tensões e correntes (medidas por equipamentos comuns no mercado) e um modelo do alimentador para o treinamento e avaliação do desempenho das redes.

9.2 TRABALHOS FUTUROS

Embora alguns passos tenham sido dados nesse trabalho, no sentido de prover novas alternativas de solução ao problema estudado, diversos trabalhos futuros podem ser derivados nas mesmas linhas de pesquisa, alguns abordados a seguir.

9.2.1 IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA “EM CAMPO”

Conforme já foi citado, toda a validação das propostas foi feita em ambiente de simulação. A implantação do sistema localizador de faltas com os métodos propostos aqui seria importante para atestar a eficiência dos procedimentos sugeridos. Reeditando o diagrama de componentes e os equipamentos auxiliares descritos no Capítulo 7, somente os módulos computacionais que compõe o programa a partir de amostras de sinais faltosos foram testados até o presente momento. Os bons resultados são o que motiva a implantação do sistema “em campo”, caso seja de interesse futuro de empresas distribuidoras.

9.2.2 INCLUSÃO DE INFORMAÇÕES ADICIONAIS NAS EQUAÇÕES DOS MÉTODOS ANALÍTICOS

Todas as equações para localização de faltas nos métodos 1 e 2 supõe o monitoramento apenas de tensões e correntes no início do alimentador. Em alimentadores que utilizassem monitoramento contínuo adicional, via unidades terminais remotas, novas grandezas poderiam estar disponíveis. Procedimentos para levar em conta essas variáveis poderiam ser incluídos no equacionamento para o cálculo da distância ao ponto de falta, a fim de se verificar a variação na precisão dos resultados em tais casos.

Nesse contexto, sistemas de distribuição automatizados e unidades de medição fasorial têm grande importância, e devem ser estudados, pois certamente podem dar origem a novas formulações ou melhorar os métodos propostos aqui.

9.2.3 AGREGAR NOVOS DISPOSITIVOS AOS MODELOS DOS ALIMENTADORES

Conforme descrito ao longo do trabalho, os modelos dos alimentadores empregados eram compostos de elementos relativamente simples, porém suficientes para avaliações satisfatórias com alguns estudos de sensibilidade. Entretanto, é importante sugerir a realização de novos testes que incluam, por exemplo, a presença de reguladores de tensão no trajeto do alimentador (que não foram representados nos modelos), além de cargas não lineares e motores elétricos de porte elevado.

9.2.4 TESTES DA METODOLOGIA BASEADA EM REDES NEURAS INCLUINDO COMPONENTES HARMÔNICAS

A arquitetura modular de redes neurais poderia ser testada com componentes diferentes da frequência fundamental, para a localização de faltas de alta-impedância. Modelos mais apurados para a impedância de falta, nesses casos, poderiam também ser incluídos.

ANEXO A**ALGORITMO DOS MÍNIMOS QUADRADOS**

O algoritmo dos mínimos quadrados foi inicialmente proposto por Karl Gauss para ser utilizado na análise de órbitas de planetas, e desde então tem sido amplamente utilizado para a estimação de parâmetros e ajuste de curvas em diversas áreas. LUCKETT et al. (1975) propuseram o emprego do algoritmo para estimar os valores de magnitude e fase de tensões e correntes em sistemas elétricos de potência.

Uma das grandes vantagens do algoritmo, é a flexibilidade na escolha do tamanho da janela de tempo, pode-se empregar conjuntos de amostras de ½ ciclo, 1 ciclo, ou a quantidade de amostras que se julgar conveniente e necessário (em função da aplicação em estudo).

SACHDEV et al. (1979) propuseram novos elementos ao algoritmo dos mínimos quadrados com vistas a sua utilização para a proteção de sistemas elétricos aumentando a sua eficiência computacional. De acordo com os autores, o sinal a ser analisado pode ser modelado por uma componente de frequência fundamental, uma componente CC que decrescente exponencialmente, e componentes de frequências harmônicas, de acordo com (A.1).

$$x(t) = X_0 e^{\frac{-t}{\tau}} + \sum_{n=1}^N X_n \text{sen}(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (\text{A.1})$$

Onde: $x(t)$ = Função temporal do sinal x ;

τ = Constante de tempo da componente exponencial decrescente;

N = Ordem da harmônica de mais alta ordem a ser considerada;

ω_0 = Frequência fundamental do sistema;

X_0 = Magnitude da componente exponencial em $t = 0$;

X_n = Magnitude da componente harmônica de ordem n ;

θ_n = Fase da componente harmônica de ordem n ;

Por conta do interesse na componente fundamental, exclusivamente, o sinal pode ser representado, no modelo de estimação de parâmetros apenas por essa componente. Componentes harmônicas podem ser incluídas no modelo, caso se deseje estimá-las (SACHDEV et al, 1991), mas isso não será feito aqui. Dessa forma, pode-se expressar uma amostra do sinal coletada no instante t_1 , por (A.2):

$$x(t_1) = X_1 \text{sen}(\omega_0 t_1 + \theta_1) \quad (\text{A.2})$$

Pode-se reescrever essa equação como:

$$x(t_1) = X_1 \cos(\theta_1) \text{sen}(\omega_0 t_1) + X_1 \text{sen}(\theta_1) \cos(\omega_0 t_1) \quad (\text{A.3})$$

A equação (A.3) pode ser representada por:

$$x(t_1) = a_{11} x_1 + a_{12} x_2 \quad (\text{A.4})$$

$$\text{Onde: } x_1 = X_1 \cos(\theta_1);$$

$$x_2 = X_1 \text{sen}(\theta_1);$$

$$a_{11} = \text{sen}(\omega_0 t_1);$$

$$a_{12} = \cos(\omega_0 t_1).$$

Considerando que o sinal $x(t)$ é amostrado em intervalos de Δt segundos, a equação

(A.4) é rescrita substituindo-se t_l por $m\Delta t$:

$$x(m\Delta t) = a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 \quad (\text{A.5})$$

$$\text{Onde: } \Delta t = 1/f_s ;$$

f_s = Freqüência de amostragem do sinal;

m = Número da amostra do sinal;

$$a_{m1} = \text{sen}(\omega_0 m\Delta t);$$

$$a_{m2} = \text{cos}(\omega_0 m\Delta t).$$

Definindo-se p como sendo o tamanho da janela de dados, ou número de amostras do sinal a serem consideradas na estimação da componente fundamental, podem-se escrever p equações similares a (A.5), o que dá origem ao sistema de equações mostrado, em sua forma matricial, na equação (A.6):

$$[A] \cdot [x] = [b] \quad (\text{A.6})$$

$$p \times 2 \quad 2 \times 1 \quad p \times 1$$

O vetor $[b]$ é constituído por p amostras do sinal $x(t)$. Para estimar o vetor de incógnitas $[x]$ é necessário que $p \geq 2$. Assim sendo, a estimativa para esse vetor é dada por (4.7):

$$[\bar{x}] = [A]^+ \cdot [b] \quad (\text{A.7})$$

$$2 \times 1 \quad 2 \times p \quad p \times 1$$

Onde: $[A]^+ = \left[[A]^T [A] \right]^{-1} \cdot [A]^T$ = Pseudo-inversa da matriz $[A]$;

$[\bar{x}]$ = Estimativa dos elementos do vetor $[x]$;

$[b]$ = Vetor de p amostras do sinal $x(t)$.

Supondo o sinal de entrada amostrado continuamente, a cada nova amostra coletada, a amostra mais antiga vai sendo excluída no cálculo dos parâmetros de interesse.

ANEXO B**DADOS DO PRIMEIRO ALIMENTADOR-TESTE****B.1 TOPOLOGIA**

A topologia do primeiro alimentador-teste, utilizado para a obtenção dos resultados do Capítulo 7, é, novamente, mostrada na figura B.1.

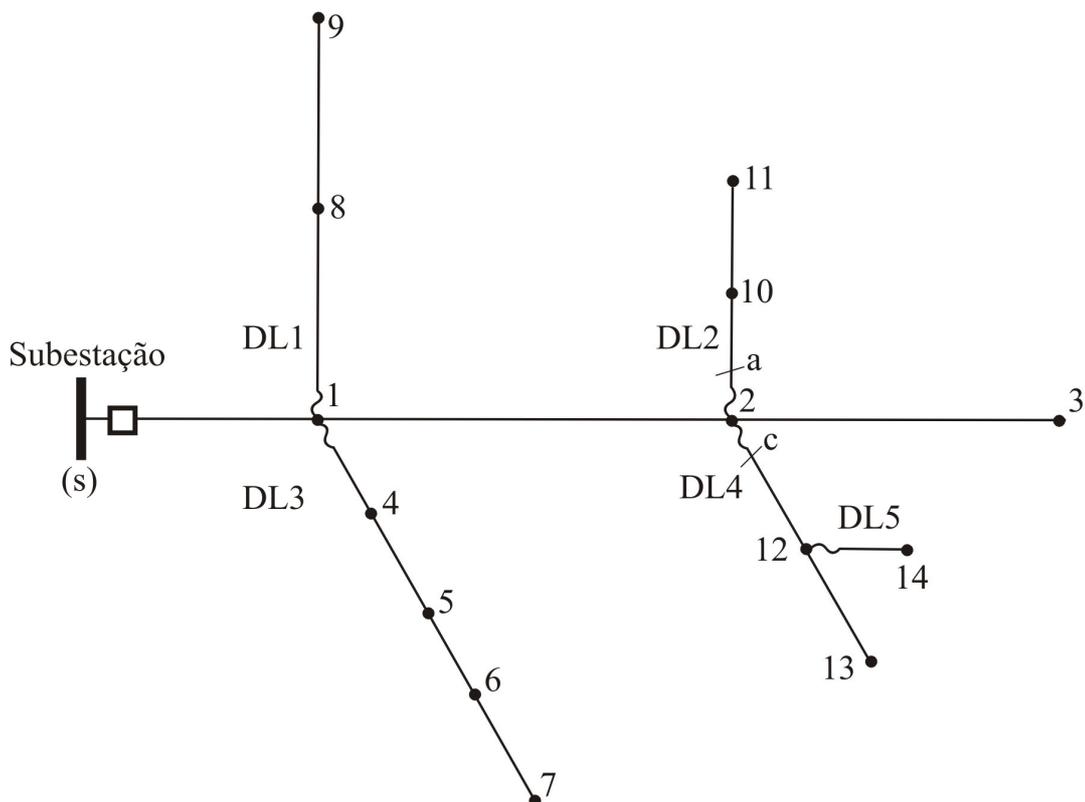


Figura B.1 - Topologia do Primeiro Alimentador-Teste.

B.2 DADOS DA SUBESTAÇÃO E IMPEDÂNCIAS DAS SEÇÕES DO ALIMENTADOR

A tabela B.1 traz os dados de impedância equivalente da subestação. Esses valores de impedância equivalente são os mesmos do alimentador-teste empregado em (DAS, 1998), cujos níveis de tensão e carregamento são semelhantes àquele empregado aqui.

Na tabela B.2, estão o comprimento e as características de impedância de cada uma das seções (sempre limitadas por dois nós). As matrizes de impedância de fases (Z_{abc}) mostradas abaixo da tabela são relacionadas com os identificadores da tabela. A configuração ID1 é trifásica, e as configurações ID2, ID3 e ID4 são monofásicas. Esses valores são função do tipo de condutor e da configuração dos mesmos, de acordo com os conceitos do Capítulo 4. Os dados de impedância das configurações empregadas foram extraídos de (KERSTING, 2002).

É importante frisar que os valores de admitância em derivação devido à capacitância das diferentes seções do alimentador (Y_{abc}^d) também foram incluídos nos dados, bem como nos modelos de simulação do ATP. Nos algoritmos para localização de faltas tais parâmetros foram desprezados devido à sua baixa influência na determinação do perfil de tensões ao se tratar de redes elétricas curtas, como alimentadores (STEVENSON, 1975).

Todos os valores das matrizes de impedância estão expressos por unidade de comprimento (em Ω/km).

Tabela B.1 - Dados da Fonte Equivalente da Subestação.

<i>Tensão Base</i>	<i>Impedância Seq. Positiva</i>	<i>Impedância Seq. Zero</i>
25 kV	0,68283 + 2,98139.j	0,09496 + 1,39289.j

Tabela B.2 - Comprimento e Configuração de Impedância das Seções do Alimentador.

<i>Seção</i>	<i>Comprimento (km)</i>	<i>Configuração</i>
s – 1	5,0	ID1
1 – 2	5,0	ID1
2 – 3	5,0	ID1
1 – 4	2,5	ID1
1 – 8	5,0	ID1
1 – 9	5,0	ID1
2 – 10	2,5	ID2
2 – 12	2,5	ID3
4 – 5	2,5	ID1
5 – 6	2,5	ID1
6 – 7	2,5	ID1
10 – 11	2,5	ID2
12 – 13	2,5	ID3
12 – 14	2,5	ID4

Configuração ID1:

$$z_{abc} = \begin{bmatrix} 0,2834 + 0,6700.j & 0,0970 + 0,3118.j & 0,0954 + 0,2392.j \\ 0,0970 + 0,3118.j & 0,2900 + 0,6515.j & 0,0982 + 0,2633.j \\ 0,0954 + 0,2392.j & 0,0982 + 0,2633.j & 0,2868 + 0,6620.j \end{bmatrix} (\Omega/\text{km});$$

$$y_{abc}^d = \begin{bmatrix} 3,5247.j & -1,1412 & -0,4372 \\ -1,1412 & 3,7150.j & -0,7265 \\ -0,4372 & -0,7265 & 3,3506.j \end{bmatrix} (\mu\Omega^{-1}/\text{km}).$$

Configuração ID2:

$$z_{abc} = \begin{bmatrix} 1,1943 + 0,8833.j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\Omega/\text{km});$$

$$y_{abc}^{sh} = \begin{bmatrix} 2,7121.j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\mu\Omega^{-1}/\text{km}).$$

Configuração ID3:

$$z_{abc} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,1943 + 0,8833.j \end{bmatrix} (\Omega/\text{km});$$

$$z_{abc}^{sh} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2,7121.j \end{bmatrix} (\mu\Omega^{-1}/\text{km}).$$

Configuração ID4:

$$z_{abc} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,7399 + 0,9232.j \end{bmatrix} (\Omega/\text{km});$$

$$y_{abc}^{sh} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2,6259.j \end{bmatrix} (\mu\Omega^{-1}/\text{km}).$$

B.2 CARGAS

A tabela B.3 mostra os dados de carga nominal instalada agrupados por trecho do alimentador no qual estão conectadas.

Finalmente, a tabela B.4 mostra os dados de carga nominal instalada em cada nó do alimentador. A potência nominal instalada por fase também é mostrada, evidenciando a tendência de desequilíbrio entre as três fases. Todas as cargas possuem fator de potência igual (0,8 - indutivo).

Tabela B.3 - Cargas Nominais por Trecho do Alimentador.

<i>Trecho</i>	<i>Carga (kVA)</i>		
	<i>Fase a</i>	<i>Fase b</i>	<i>Fase c</i>
AP	30	30	30
DL1	37.5	37.5	37.5
DL2	15	0	0
DL3	30	30	30
DL4	0	0	15
DL5	0	0	7.5
Total	112,5	97,5	120

Tabela B.4 - Cargas Nominais dos Diferentes Nós do Alimentador.

<i>Nó</i>	<i>Carga (kVA)</i>		
	<i>Fase a</i>	<i>Fase b</i>	<i>Fase c</i>
3	30	30	30
4	7.5	7.5	7.5
5	7.5	7.5	7.5
6	7.5	7.5	7.5
7	7.5	7.5	7.5
8	30	30	30
9	7.5	7.5	7.5
10	7.5	0	0
11	7.5	0	0
12	0	0	7.5
13	0	0	7.5
14	0	0	7.5
Total	112,5	97,5	120

ANEXO C

DADOS DO SEGUNDO ALIMENTADOR-TESTE

C.1 TOPOLOGIA

A topologia do segundo alimentador-teste, ou o alimentador IEEE - 34 nós é mostrada na figura C.1.

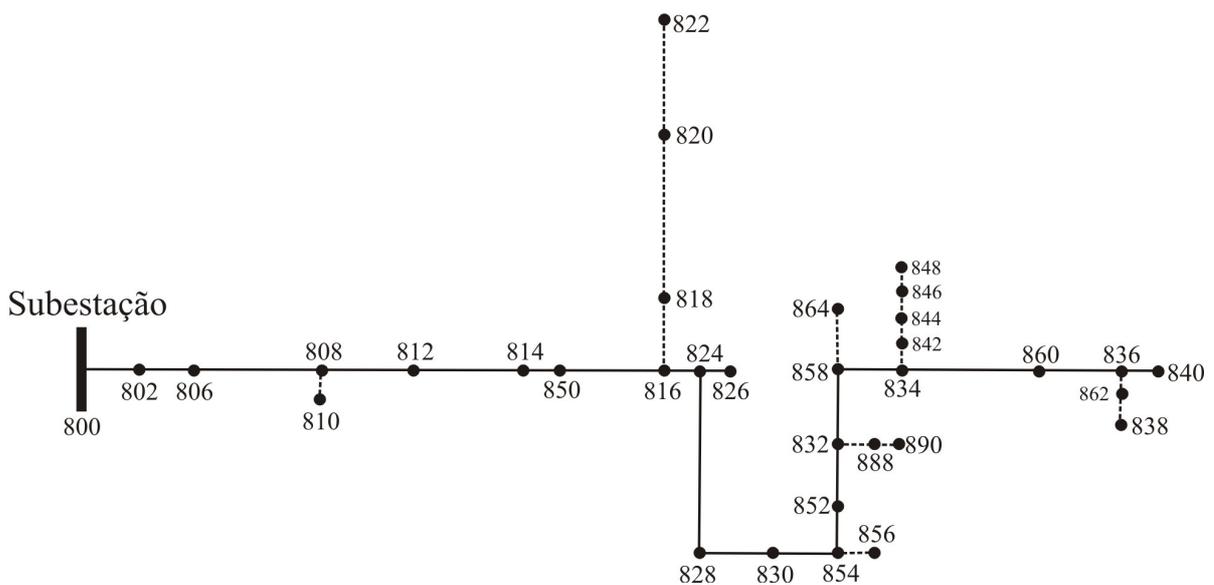


Figura C.1 - Topologia do Segundo Alimentador-Teste.

C.2 SUBESTAÇÃO E IMPEDÂNCIAS DAS SEÇÕES DO ALIMENTADOR

O transformador da subestação do alimentador IEEE - 34 nós possui uma tensão de linha de 24,9 kV, sendo conectado em Y aterrado.

Na tabela C.1, estão o comprimento e as características de impedância de cada uma

das seções. As matrizes de impedância e admitância de fases por unidade de comprimento são mostradas abaixo da tabela.

Tabela C.1 - Comprimento e Configuração de Impedância das Seções do Alimentador.

<i>Nó A</i>	<i>Nó B</i>	<i>Comprimento da Seção (km)</i>	<i>Configuração</i>
800	802	0,786	300
802	806	0,527	300
806	808	9,823	300
808	810	1,769	303
808	812	11,43	300
812	814	9,061	300
814	850	0,003	301
816	818	0,521	302
816	824	3,112	301
818	820	14,676	302
820	822	4,187	302
824	826	0,923	303
824	828	0,256	301
828	830	6,230	301
830	854	0,158	301
832	858	1,493	301
834	860	0	301
834	842	0,615	301
836	840	0,085	301
836	862	0,262	301
842	844	0,085	301

<i>Nó A</i>	<i>Nó B</i>	<i>Comprimento da Seção (km)</i>	<i>Configuração</i>
844	846	0,411	301
846	848	1,109	301
850	816	0,161	301
852	832	0,094	301
854	856	0,003	303
854	852	7,110	301
858	864	11,225	303
858	834	0,493	301
860	836	1,776	301
862	838	0,816	304
888	890	1,481	300

Configuração 300:

$$z_{abc} = \begin{bmatrix} 0,8355 + 0,8339.j & 0,1304 + 0,3589.j & 0,1322 + 0,3114.j \\ 0,1304 + 0,3589.j & 0,8222 + 0,8427.j & 0,1283 + 0,2851.j \\ 0,1322 + 0,3114.j & 0,1283 + 0,2851.j & 0,8257 + 0,8367.j \end{bmatrix} (\Omega/\text{km});$$

$$y_{abc}^d = \begin{bmatrix} 3,3136.j & -0,9511 & -0,6176 \\ -0,9511 & 3,1663.j & -0,3858 \\ -0,6176 & -0,3858 & 3,0360.j \end{bmatrix} (\mu\Omega^{-1}/\text{km}).$$

Configuração 301:

$$z_{abc} = \begin{bmatrix} 1,1987 + 0,8821.j & 0,1454 + 0,4026.j & 0,1474 + 0,3556.j \\ 0,1454 + 0,4026.j & 1,1973 + 0,8930.j & 0,1430 + 0,3273.j \\ 0,1474 + 0,3556.j & 0,1430 + 0,3273.j & 1,2011 + 0,8880.j \end{bmatrix} (\Omega/\text{km});$$

$$y_{abc}^d = \begin{bmatrix} 3,2004.j & -0,8977 & -0,5875 \\ -0,8977 & 3,0625.j & -0,3719 \\ -0,5875 & -0,3719 & 2,9470.j \end{bmatrix} (\mu\Omega^{-1}/\text{km}).$$

Configuração 302:

$$z_{abc} = \begin{bmatrix} 1,7497 + 0,9284.j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\Omega/\text{km});$$

$$y_{abc}^{sh} = \begin{bmatrix} 2,6407.j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\mu\Omega^{-1}/\text{km}).$$

Configuração 303:

$$z_{abc} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,7497 + 0,9284.j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\Omega/\text{km});$$

$$y_{abc}^{sh} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2,6407.j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\mu\Omega^{-1}/\text{km}).$$

Configuração 304:

$$z_{abc} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,2010 + 0,8882.j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\Omega/\text{km});$$

$$y_{abc}^{sh} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2,7273.j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\mu\Omega^{-1}/\text{km}).$$

C.2 CARGAS

As tabelas C.2 e C.3 trazem os dados de carga do alimentador e o tipo de conexão das mesmas. São, respectivamente, *cargas concentradas* e *cargas distribuídas*, de acordo com o modelo provido pelo IEEE. Nos estudos de simulação com o ATP, as cargas distribuídas foram alocadas ao final da seção em que estão alocadas.

Tabela C.2 – Cargas Concentradas.

<i>Nó</i>	<i>Conexão</i>	<i>kW</i>	<i>kVAR</i>	<i>kW</i>	<i>kVAR</i>	<i>kW</i>	<i>kVAR</i>
	<i>Tipo</i>	<i>Fase a</i>	<i>Fase a</i>	<i>Fase b</i>	<i>Fase b</i>	<i>Fase c</i>	<i>Fase c</i>
860	Y	20	16	20	16	20	16
840	Y	9	7	9	7	9	7
844	Y	135	105	135	105	135	105
848	Δ	20	16	20	16	20	16
890	Δ	150	75	150	75	150	75
830	Δ	10	5	10	5	25	10
Total		344	224	344	224	359	229

Tabela C.3 - Cargas Distribuídas.

<i>Nó A</i>	<i>Nó B</i>	<i>Conexão</i>	<i>kW</i>	<i>kVAR</i>	<i>kW</i>	<i>kVAR</i>	<i>kW</i>	<i>kVAR</i>
		<i>Tipo</i>	<i>Fase a</i>	<i>Fase a</i>	<i>Fase b</i>	<i>Fase b</i>	<i>Fase c</i>	<i>Fase c</i>
802	806	Y	0	0	30	15	25	14
808	810	Y	0	0	16	8	0	0
818	820	Y	34	17	0	0	0	0
820	822	Y	135	70	0	0	0	0
816	824	Δ	0	0	5	2	0	0
824	826	Y	0	0	40	20	0	0
824	828	Y	0	0	0	0	4	2
828	830	Y	7	3	0	0	0	0
854	856	Y	0	0	4	2	0	0
832	858	Δ	7	3	2	1	6	3
858	864	Y	2	1	0	0	0	0
858	834	Δ	4	2	15	8	13	7
834	860	Δ	16	8	20	10	110	55

<i>Nó A</i>	<i>Nó B</i>	<i>Conexão</i>	<i>kW</i>	<i>kVAR</i>	<i>kW</i>	<i>kVAR</i>	<i>kW</i>	<i>kVAR</i>
		<i>Tipo</i>	<i>Fase a</i>	<i>Fase a</i>	<i>Fase b</i>	<i>Fase b</i>	<i>Fase c</i>	<i>Fase c</i>
860	836	Δ	30	15	10	6	42	22
836	840	Δ	18	9	22	11	0	0
862	838	Y	0	0	28	14	0	0
842	844	Y	9	5	0	0	0	0
844	846	Y	0	0	25	12	20	11
846	848	Y	0	0	23	11	0	0
<i>Total</i>			262	133	240	120	220	114

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, R.; SONG, Y.; 1997. Tutorial – Artificial Neural Networks in Power Systems, Part 1 General introduction to neural computing. *IEE Power Engineering Journal*, v.11, v.3, pp.1129-134

AGGARWAL, R.; SONG, Y.; 1998a. Tutorial – Artificial Neural Networks in Power Systems, Part 2: Types of Artificial Neural Networks. *Power Engineering Journal*. v. 12, n. 1, (Feb. 1998), p. 41-47.

AGGARWAL, R.; SONG, Y.; 1998b. Tutorial – Artificial Neural Networks in Power Systems, Part 3: Examples of Applications in Power Systems. *Power Engineering Journal*. v. 12, n. 6 (Dec.), p. 279-287.

ANDERSON, P. M.; 1999. *Power System Protection*. New York: McGraw Hill-IEEE Press.

ARAÚJO, C. A.; CÂNDIDO, J. R.; SOUZA, F. C. et al. 2005. *Proteção de Sistemas Elétricos*. Rio de Janeiro: Interciência - Light.

ASSEF, Y.; CHAARI, O.; MEUNIER, M.; 1996. Classification of Power Distribution System Fault Currents Using Wavelets Associated to Artificial Neural Networks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TIME-FREQUENCY AND TIME-

- SCALE ANALYSIS, *Proceedings*, p. 421-424.
- BO, Z. O.; WELLER, G.; REDFERN M. A.; 1999. Accurate Fault Location Technique for Distribution System Using Fault-Generated High-Frequency Transient Voltage Signals. *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, v. 146, n. 1 (Jan.), p. 73-39.
- BRETAS, A. S.; HADJSAID, N.; 2001. Fault Diagnosis In Deregulated Distribution Systems using an Artificial Neural Network. In: POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING (2001). *Proceedings*, v. 2, p. 821-823.
- CHAARI, O.; MEUNIER, M.; BROUAYE, F.; 1996. Wavelets: A New Tool for The Resonant Grounded Power Distribution System Relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 11, n. 3 (July), p. 1301-1308.
- CHOI, M. S.; LEE, S. J.; JIM, B. G.; 2004. A New Fault Location Algorithm Using Direct Circuit Analysis for Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1), p. 35-41.
- CHOW, M.; YEE, S. O.; TAYLOR, L. S.; 1993 Recognizing Animal-Caused Faults in Power Distribution Systems Using Artificial Neural Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 3 (July), p. 1268-1273.
- COSER, J.; ROLIM, J. G., 2004a. A Method for Fault Location in Distribution Systems.

- In: UPEC - International University Power Engineering Conference, 2004, Bristol. UPEC 2004 Proceedings, 2004. p. 1-5.
- COSER, J.; ROLIM, J. G., 2004b. Metodologia para Diagnóstico de Faltas em Sistemas de Distribuição Utilizando Redes Neurais Artificiais. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2004, Gramado. CBA 2004 - Anais, 2004. p. 1-6.
- COSER, J.; ROLIM, J. G., 2005a. Fast Fault Location Technique for Distribution System. In: POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE (PSCC 2005, 22-26 Oct., Liège). *Proceedings*, p. 1-7.
- COSER, J.; ROLIM, J. G., 2005b. Fault Location Technique for Distribution Systems Based on Circuit Analysis. In: UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (UPEC 2005, 7-9 Sept., Cork.). *Proceedings*. p. 1-5.
- COSER, J.; ROLIM, J. G., 2005c. Artificial Neural Network Based Method for Fault Location in Distribution Systems. In: INTELIGENT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS (ISAP 2005, Washington D. C.), *Proceedings*, p- 1-6.
- COURY, D. V.; JORGE, D. C.; 1998. Artificial Neural Network Approach to Distance Protection of Transmission Line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 1 (Jan.), p. 102-108.
- DALSTEIN, T.; FRIEDRICH, T.; KULICKE, B. et al.; 1996. Multi Neural Network Based

- Fault Area Estimation for High-Speed Protective Relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11 (April), n.2, p. 740-747.
- DAS, R. (1998) Determining the Locations of Faults in Distribution Systems. Saskatoon, Canada (Doctoral Thesis). Department of electrical Engineering. University of Saskatchewan.
- DAS, R.; SACHDEV, M. S.; SIDHU, T. S.; 1995. A Technique for Estimating the Location of Shunt Faults on Distribution Lines. In: IEEE WESCANEX (May 15-16, 1995), *Proceedings*, v.1, p. 6-11.
- DAS, R.; SACHDEV, M. S.; SIDHU, T. S.; 2000. A Fault Locator for Radial Sub-transmission and Distribution Lines. POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING. *Proceedings*, v. 1, p. 443-448.
- DAUBECHIES, I; 1997. *Ten Lectures on Wavelet*. Montpellier: Capital city Press.
- ELETROBRÁS; 1982. *Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição*. Rio de Janeiro: Campus.
- FLEXER, A.; 1996. Statistical evaluation of neural network experiments: Minimum requirements and current practice. In: 13TH EUROPEAN MEETING ON CYBERNETICS AND SYSTEMS (Austrian Society for Cybernetic Studies, 1996). *Proceedings*. p. 1005-1008.

GE SISTEMAS INDUSTRIAIS; 2005. *Catálogos*. Disponível em <http://www.geindustrial.com.br/suporte/publicacoes/catalogos/>. Último acesso: Dezembro/2005.

GIRGIS, ADLY A.; FALLON, CHRISTOPHER M.; LUBKEMAN, DAVID L.; 1993. A Fault Location Technique for Rural Distribution Feeders. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 29. n. 6 (Nov./Dec.). p. 1170-1175.

GLINKOWSKI, M. T.; WANG, N. C.; 1995. ANNs Pinpoint Underground Distribution Faults. *IEEE Computer Applications in Power*, v. 8, ed. 4 (Oct.), p. 31-34.

HAYKIN, S.; 1994. *Neural Networks a Comprehensive Foundation*. New York: Macmillan.

INFO-LABVIEW; 2005. *Resources*. Disponível em: <http://www.info-labview.org>. Último acesso: Dezembro/2005.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS; 2004. *Draft guide for Determining Fault Location on AC Transmission and distribution Lines*. Standard PC37.114.

JOHNS, A. T.; JAMALI, S.; 1990. Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines. *IEE Proceedings*, v. 137, Pt. C, n. 6 (Nov), p. 395-402.

JOHNS, A. T.; SALMAN S. K.; 1995. Digital Protection for Power Systems. London: Peter Peregrinus Ltd.

KAISER, G. A.; 1994. *A Friendly Guide to Wavelets*, 9 ed. Woodbine: Birkhäuser.

KEZUNOVIC, M.; LUO, S.; GALISAJEVIC, Z. et al.; 2004. Accurate Fault Location in Transmission Networks Using Modeling, Simulation and Limited Field Recorded Data. *Power Systems Engineering Research Center Publication*, n. 02-44 (Nov), p. 1-58.

KERSTING, W. H.; 2001. Radial Distribution Test Feeders. In: POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING (Columbus, OH, USA). *Proceedings*. 2001. v. 2. p. 908-912.

KERSTING, W. H.; 2002. *Distribution System Modeling and Analysis*. Boca Raton: CRC Press.

LAVERTY, E.; SCHULZ, N. N.; 1999. An Improved Algorithm to Aid in Post Heat-Storm Restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n.2 (May), p. 446-451.

LEE, S. J.; CHOI, M. S.; KANG, S.H. et al.; 2004. An Intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, p.1005-1010.

- LEWIS, L. J.; 1951. Traveling Wave Relations Applicable to Power System Fault Locators. *AMIFE Transactions*, n. 70, p. 1671-1680.
- LI, L.; REDFERN, M. A.; 2001. A Review of Techniques to Detect Downed Conductors in Overhead Distribution Systems. *Developments in Power System Protection*. Conference Publication n. 479, p. 169-172.
- LIU, Y.; SCHULZ, N. N.; 2002. Knowledge Based System for Distribution System Outage Locating Using Comprehensive Information. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 17, n. 2 (May), p. 451-456.
- LUCKETT, R. G.; MUNDAY, P. J.; MURRAY, B. E.; 1975. A Substation Based Computer for control and Protection. *IEE Conference Publication*, London, n. 125 (Mar.).
- MARQUARDT, D. W.; 1963 An Algorithm for Least Squares Estimation of Non-Linear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, v. 11, n. 3, p. 431-441.
- MATLAB; 2002. The Language of Technical Computing: versão 6.5 r13. [S.I.]: The Mathworks Inc.
- MEDEIROS, A. D. R. ; MANZONI, A. ; ZURN, H. H. ; COSTA, A. A. S.; 1995. Uma

- Ferramenta Eficiente para Análise Elétrica de Sistemas Radiais de Energia Elétrica.
In: XI CONGRESO CHILENO DE INGENIERIA ELECTRICA - ELECTRO 95
(1995, Punta Arenas). *Anais*, p. 116-121.
- MONTKAHAB, M. R.; ADAMS, R. N.; 1998. Intelligent System for Fault Diagnosis on
Low voltage Distribution Networks. *IEE Proc. Generation, Transmission and
Distribution*. v. 145, ed. 5, p. 592-596.
- MOHAMED E. A.; RAO, N. D.; 1995. Artificial Neural Network Based Fault Diagnostic
System for Electric Power Distribution Feeders. *Electric Power System Research*,
n. 35, p. 1-10.
- MOMOH, J. A.; DIAS, L. G.; LAIRD, D. N.; 1997. Implementation of a hybrid intelligent
tool for distribution system fault diagnosis. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v. 12,
n. 2 (April), p. 1035-1040.
- MORETO, M.; BRETAS, A. S.; BAZANELLA, A. S.; 2004. Uma metodologia baseada
em redes neurais artificiais para localização de faltas de alta impedância em
sistemas de distribuição. In: VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES
NEURAS (2004, São Luiz – MA, Brasil). *Anais*.
- NOURI, H.; WANG, C.; DAVIES, T.; 2001. An Accurate Fault Location Technique for
Distribution Lines with Tapped Loads Using Wavelet Transform. In: PORTO
POWER TECH CONFERENCE. *Proceedings*, v. 3, p. 10-13.

OPENHEIM, A. V.; SCHAFFER, R. W.; 1989. *Discrete-time Signal Processing*. 20 ed. Englewood: Prentice Hall.

PEREIRA, R. A. F.; SILVA, L. G.; MANTOVANI, J. R. S.; 2004. Localização de Falhas em Alimentadores de Distribuição Através de Lógica Fuzzy e Algoritmos de Busca Inteligente. In: XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (Sendi 2004), *anais*, p. 14.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S.; 1988. *Computer Relaying for Power Systems*. New York: Wiley.

REINERI, C. A.; ALVAREZ, C.; 1999. Load Research for Fault Location in Distribution Feeders. *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, v. 146, n. 2, p. 115-120.

RUMELHART, D. E.; MCCLELLAND, J. L.; 1986. *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. Cambridge: MIT Press.

SACHDEV, M. S.; AGGARWAL, R.; 1988. A Technique for Estimating Transmission Line Fault Location from Digital Impedance Relay Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3. n. 1 (Jan.), p.121-129.

SACHDEV, M. S.; BERIBEAU, M. A.; 1979, A New Algorithm for Digital Impedance

- Relays. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-98 (Nov./Dec.), p. 2232-2240.
- SACHDEV, M. S.; NAGPAL, M.; 1991. A Recursive Least Error Squares Algorithm for Power System Relaying and Measurement Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 3(July), p. 1008-1015.
- SANT, M. T.; PAITHANKAR, Y. G.; 1979. Online Digital Fault Locator for Overhead Transmission Line. *IEE Proceedings*, v. 126, n.11 (Nov.), p. 1181-1185.
- SANTOSO, S.; DUGAN, R. C.; LAMOREE, J. et al.; 2000. Distance estimation technique for single line to ground faults in a radial distribution system. In: POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING (IEEE, 2000). *Proceedings*, v. 4, p. 2551-2555.
- SCOTT-MEYER, W. 1992. *EMTP-ATP Rule Book*. Leuven: Leuven EMTP Center.
- SHIMOHAMMADI, D.; HON, H. W.; SEMLYEN, A. ET AL.; 1988. A Compensation Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Network. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3 (May), n. 2, p. 753-762.
- SIDHU, T. S.; SINGH, H.; SACHDEV, M. S.; 1995. Design Implementation and Testing of an Artificial Neural Network Based Fault Direction discriminator for Protecting Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10 (April), n. 2, p.

697-706.

SILVEIRA, P. M. (2001) *Identificação e Localização de Falhas Utilizando Análise por Decomposição Wavelet para Relés de Linhas de Transmissão*. Florianópolis (Tese de Doutorado). Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Catarina.

SOUSA, M.; COSTA, C. A.; PEREIRA JUNIOR, I. H. et al.; 2005. Sistema de Localização Automática de Falhas em Linhas de Transmissão – Experiência da CEMIG. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (XVIII SNPTEE, Curitiba, 26-21 de Out. 2005), *Anais*, CGP - 22.

SOUZA MARTINS, L., MARTINS, J. F., ALEGRIA, C. M., AND FERNÃO PIRES, V.; 2003. A Network Distribution Power System Fault Location Based on Neural Eigenvalue Algorithm. In; IEEE BOLOGNA POWER TECH CONFERENCE PROCEEDINGS, v. 2 (June), p. 23-26.

SRINIVASAN, K.; NHUYEN, C. T.; ROBICHAUD, Y. et al.; 1981. Load Response Coefficients Monitoring System: Theory and Field Experience. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. v. PAS-100 (Aug.), p. 3818-3827.

SRINIVASAN, K.; ST-JACQUES, A. (1989) A New Fault Location Algorithm for Radial Transmission Lines With Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 04, n. 3

(July), p. 1676-1682.

STD-IEEE; 1993. *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers. C57.13 - 1993.*

STEVENSON, W. D.; 1975. *Elements of Power System Analysis.* New York: McGraw Hill.

STEWART, S.; 2004. *Distribution Switchgear.* Bodmin: MPG Books Limited.

STRINGFIELD, T. W.; MARIHART D. J.; STEVENS R. F.; 1957 Fault Location Methods for Overhead Lines. *Transactions of the AIEE, part III – Power Apparatus and Systems*, v. 76 (Aug.), p. 518-539.

TAKAGY, T.; YAMAKOSHI, T.; YAMAURA, M., et al.; 1982 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 (Aug.), n. 8, p. 1892-2898.

THOMAS, D. W. P.; CARVALHO, R. J. O.; PEREIRA, E. T.; 2003. Fault Location in Distribution Systems Based on Traveling Waves. In: IEEE BOLOGNA POWER TECH CONFERENCE (Bologna, Italy, 23-26 June 2003). *Proceedings*, v. 2.

VALADÃO, R.; 2005. Nova Versão de Sistema Localizador de Faltas para Linhas e Redes

de Distribuição e Sua Aplicação a Casos Reais e Simulados. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (XVIII SNPTEE, Curitiba, 26-21 de Out. 2005), *Anais*, CGP - 23.

WARRINGTON, A. R.; VAN C.; 1968. *Protective Relays, Their theory and Practice, Vol. 1*. London: Chapman and Hall Ltd.

WAY, D. C. T.; YBIN, X.; 1998. A Novel Technique for High Impedance Fault Identification. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 3, p. 739-744.

ZHU, J.; LUBKEMAN, D. L.; GIRGIS, A. A.; 1997. Automated Fault Location and Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders. *IEEE Transactions on Power delivery*, v. 12, n. 2 (April), p. 801-809.